



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VLIV AKTIVNÍCH PŘÍMĚSÍ NA AKTIVITU  
CEMENTOVÉHO TMELE S NEALKALICKOU  
URYCHLOVACÍ PŘÍSADOU PRO STŘÍKANÉ BETONY.**

EFFECT OF ACTIVE INGREDIENTS TO THE ACTIVITY OF CEMENTING COMPOUND WITH  
NON-ALKALINE ACCELERATOR ADDITIVE FOR SPRAYED CONCRETE.

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jakub Závacký**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jakub Závacký
Název	Vliv aktivních příměsí na aktivitu cementového tmele s nealkalickou urychlovací přísadou pro stříkané betony.
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2016.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

V současné době se při budování tunelových staveb hojně využívá technologie stříkaného betonu. V technologii stříkaného betonu je jedním z nejdůležitějších parametrů náběh pevností, který závisí na aktivitě cementového tmele s nealkalickou urychlovací přísadou při mokřém stříkání. V praxi je využíváno pouze portlandských cementů a použití příměsí ve stříkaném betonu není dostatečně probádáno. Tématem bakalářské práce bude ověření různých typů aktivních příměsí v kombinaci s CEM I 42,5 na doby tuhnutí a tvrdnutí a náběhy pevností v době do 24 hodin. Vhodné kombinace můžou snížit cenu stříkaných betonů a zlepšit např. trvanlivost v chemicky agresivních prostředích.

Předmětem této bakalářské práce je:

V teoretické části práce proveďte literární rešerše z domácí a hlavně zahraniční odborné literatury se zaměřením na chování bezalkalických urychlovačů a různých typů cementů resp. aktivních příměsí.

V praktické části proveďte laboratorní ověření chování 2 typů bezalkalických urychlovačů od různých výrobců na různých recepturách cementového tmele. Ověřte cementy CEM I 42,5 od 3 různých výrobců v ČR (Mokrá, Hranice a Prachovice). Dále navrhnete a ověřte kombinace těchto cementů s aktivními příměsemi (struska, popílek, vápenec, mikromletý vápenec).

Experimentálně ověřte:

- doby tuhnutí a tvrdnutí pomocí Viccatova přístroje
- stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 6 a 24 hodinách
- vyhodnocení a zpracování výsledků laboratorních zkoušek

Rozsah práce min. 40 stran

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zoberá problematikou striekaných betónov so zameraním na použitie aktívnych prímiesí s nealkalickou urýchľovacou prísadou. Teoretická časť je pojatá formou rešerše o dosadávateľných poznatkoch používania aktívnych prímiesí v striekanom betóne a ich vplyvom na proces hydratácie. V rámci experimentálnej časti bola laboratórne porovnávaná a overovaná reaktivita cementového tmelu s nealkalickými urýchľovačmi na báze síranu hlinitého pri použití aktívnych prímiesí (troska, popolček, mikromletý vápenec). Overované boli cementy CEM I 42,5 R od rôznych výrobcov na základe doby tuhnutia a tvrdnutia pomocou Vicatovho prístroja a stanovenia pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 6 a 24 hodinách.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

striekaný betón, aktívne prímiesi, vysokopecná troska, popolček, mikromletý vápenec, cement, urýchľovacie prísady, síran hlinitý, doba tuhnutia a tvrdnutia, nábeh počiatočných pevností

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the problems of the sprayed concrete with the focus on usage of the active ingredients with non-alkaline accelerator additive. The theoretical part covers the current level of knowledge of how the active ingredients are used in the sprayed concrete and their influence on the process of hydration. In the experimental part the reactivity of cementing compound with non-alkaline accelerator on the basis of aluminium sulphate were compared in a laboratory when the active ingredients (such as slag, fly-ash and very fine limestone) were used. The cements CEM I 42,5 R, made by different producers were verified on the basis of the setting time and early strength gain using the Vicat needle to examine the mechanical properties after 6 and 24 hours.

## **KEYWORDS**

sprayed concrete, active ingredients, slag, fly-ash, very fine limestone, cement, non-alkaline accelerator, aluminium sulphate, setting time, early strength gain

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Jakub Závacký *Vliv aktivních příměsí na aktivitu cementového tmele s nealkalickou urychlovací přísadou pro stříkané betony*. Brno, 2017. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

---

Jakub Závacký  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. za jeho odbornú pomoc, hlavne pri vypracovávaní praktickej časti. Tiež ďakujem pracovníkom ústavu THD pani Blanke Bártovej a pánovi Vladimírovi Klímovi, za pomoc pri skúšaní vzoriek. Masívne poďakovanie bez pochyby mojej rodine, ktorá mi svojou fyzickou i psychickou podporou umožnila štúdium na vysokej škole.

# OBSAH

1 ÚVOD .....	7
2 CIEĽ PRÁCE .....	9
3 TEORETICKÁ ČASŤ .....	10
3.1 Striekaný betón, jeho história a použitie .....	10
3.1.1 Čo je striekaný betón .....	10
3.1.2 História striekaného betónu .....	11
3.1.3 Použitie striekaného betónu .....	12
3.2 Požiadavky na vlastnosti mladého striekaného betónu .....	13
3.2.1 Požiadavky na typy striekaného betónu podľa účelu použitia .....	13
3.2.2 Pevnosti mladého striekaného betónu .....	14
3.2.3 Pevnosť zrelého striekaného betónu .....	15
3.2.4 Trvanlivosť a životnosť .....	16
3.2.5 Odolnosť proti priesaku vody .....	16
3.2.6 Spad .....	17
3.2.7 Priľnavosť .....	17
3.2.8 Mrazuvzdornosť .....	17
3.2.9 spracovateľnosť a konzistencia .....	18
3.5.10 Odolnosť proti chemicky agresívnemu prostrediu .....	18
3.3 Technológia striekania .....	19
3.3.1 Striekanie suchou cestou .....	19
3.3.2 Striekanie mokrou cestou .....	20
3.4 Zložky striekaného betónu .....	23
3.4.1 Cement .....	23
3.4.2 Kamenivo .....	23
3.4.3 Voda .....	25
3.4.4 Prísady .....	26
3.4.4.1 Plastifikačné prísady .....	26
3.4.4.2 Ostatné prísady .....	26
3.4.5 Prímesi .....	27
3.4.5.1 Kremičité odprašky – mikrosilika (silica fume) .....	28
3.4.5.2 Troska (struska) .....	29
3.4.5.3 Popolček (popílek) .....	30
3.4.5.4 Vápenec .....	31
3.4.6 Výstuž .....	33
3.5 Urýchľovanie hydratačného procesu v striekanom betóne .....	34
3.5.1 Urýchľovacie prísady .....	34
3.5.1.1 Uhličitany a hydroxidy kovov alkalických zemín .....	35

3.5.1.2 Alkalické silikáty (vodné sklo) .....	35
3.5.1.3 Sodné a draselné hlinitany .....	35
3.5.1.4 Práškové nealkalické urýchľovacie prísady .....	36
3.5.1.5 Tekuté nealkalické urýchľovacie prísady .....	37
3.5.1.6 Striekané betóny bez urýchľovacej prísady .....	37
3.5.2 Faktory ovplyvňujúce funkciu urýchľovacej prísady .....	37
4 PRAKTICKÁ ČASŤ .....	38
4.1 Metodika .....	38
4.1.1 Skúška reaktivity cementového tmelu s urýchľovacou prísadou .....	38
4.1.2 Postup skúšky reaktivity použitý v tejto práci .....	39
4.2 Použitý materiál .....	42
4.3 Zloženie skúšobných receptúr .....	43
4.4 Výsledky laboratórnych skúšok .....	44
4.4.1 Doby tuhnutia a tvrdnutia .....	44
4.4.2 Pevnosti v ťahu za ohybu .....	45
4.4.3 Pevnosti v tlaku .....	47
4.5 Diskusia k výsledkom experimentov .....	48
5 ZÁVER .....	50
6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....	52
7 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV .....	54
8 ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV .....	54
9 ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK .....	55



# 1 ÚVOD

Stavebníctvo ako jedno z najväčších odvetví priemyslu využíva obrovské množstvá rôznych materiálov. Vývojom nových a optimalizáciou tradičných stavebných materiálov a technológií je možné dosiahnuť zlepšenie vlastností daného materiálu alebo významnú úsporu finančných nákladov na výstavbu v nadväznosti napríklad na možnosti využitia vedľajších odpadných produktov alebo energeticky menej náročných surovín ako čiastočnej náhrady za energeticky veľmi náročné zložky akou je cement.

Tradičným materiálom pre stavebníctvo po celom svete je betón, ktorý vzniká zmiešaním a vytvrdnutím cementového spojiva, vody, plniva – kameniva, prípadne prísad a prímiesí. Typickým prvoradým atribútom betónu je pevnosť v tlaku, avšak iné vlastnosti ako napríklad pevnosť v ťahu, moduly pružnosti, trvanlivosť, reológia, nábehy pevností, atď. sú nemenej dôležité. Tieto vlastnosti je možné výrazne ovplyvňovať zmenou pomeru zložiek, ale aj ich vlastností, napríklad zmenou zrnitosti kameniva. Rozmanitosť vlastností a možností použitia betónu je veľmi široká a jej limity sa líšia pre rôzne technológie výroby a spôsoby spracovania.

Jednou z technológií výrazne meniacich možnosti použitia betónu je technológia striekaného betónu. Striekaný betón je celosvetovo známy pod názvami „Gunité“, „Sprayed concrete“, „Torkret“ ale najčastejšie „Shotcrete“. Je to jediná technológia umožňujúca vytvárať od sklonených, cez zvislé až po previsnuté konštrukcie bez často zložitého a nákladného debnenia.

Striekaný betón sa používa na geotechnické konštrukcie stabilizácie svahov a skalných stien, ďalej na opravy a zosilňovanie betónových konštrukcií, ale najväčšie využitie má v podzemnom stavitelstve pri budovaní tunelových stavieb a to konkrétne Novou Rakúskou Tunelovacou Metódou, skrátene NRTM. Zachytávanie výrubu pri aplikácii tejto metódy vyžaduje z geotechnického hľadiska dostatočne rýchly nábeh pevnosti betónu primárneho ostenia, aby prišlo k správne mu spolupôsobeniu primárneho ostenia s okolitým horninovým masívom.

Výstavba dopravnej siete s parametrami štandardnými vo vyspelých krajinách Európy si v hornatých územiach ako je napríklad aj Slovensko, vyžaduje budovanie železničných i cestných tunelových stavieb. V súčasnosti prebiehajúca a plánovaná výstavba dopravnej

infraštruktúry na Slovensku zažíva nebývalé využitie tunelov. Táto potreba vznikla ako nadväznosť na dostavbu najnáročnejších úsekov diaľničnej siete. Vo výstavbe je sedem diaľničných tunelov a v pláne a ideových návrhoch je ďalších asi 40 cestných, diaľničných a železničných tunelov. Technológiu striekaného betónu na našom území nemôžeme preto považovať za okrajovú záležitosť stavebníctva, ale za jeho bežnú súčasť a vývoj v tejto oblasti je viac než opodstatnený.

Aplikácia striekaného betónu spočíva v hnaní betónovej zmesi vysokým tlakom do trysky a v jej vrhaní vysokou rýchlosťou na podklad, teda na miesto budúcej konštrukcie, kde vytvára homogénnu a hutnú vrstvu. Technológia sa delí na dva základné druhy v závislosti od spôsobu pridania vody do betónovej zmesi. Jedným je striekanie suchou cestou, kedy sa voda pridáva až v tryske a druhým je striekanie mokrou cestou, kedy sa voda pridáva už pred vstupom do striekacieho zariadenia, spravidla priamo na betonárni. Po dopade zmesi na podklad musí začať tuhnutie tak, aby sa zmes udržala aj na spodnej strane vodorovného povrchu. Rýchly nástup tuhnutia a nábeh pevností sa dosahuje použitím urýchľovacích prísad. Urýchľovacie prísady sa pridávajú najčastejšie až v tryske v množstvách 2 – 10 % z hmotnosti cementu.

Rýchlosť nábehu pevností závisí na reaktivite cementového tmelu s urýchľovacou prísadou, teda na kompatibilite použitého cementu, urýchľovacej prísady a plastifikačnej prísady, prípadne prímеси. Využitie prímеси v tradičnom betóne riešilo v minulosti množstvo prác a výskumných projektov. Táto práca sa zaoberá využitím prímеси v striekanom betóne, nakoľko v praxi sa používajú výhradne iba portlandské cementy a použité prímеси v striekanom betóne nie je dostatočne prebádané, ale nie je ani vylúčené. Avšak striekacie zariadenie, ktoré ženie betónovú zmes do trysky, je nevyhnutou a technicky najnáročnejšou súčasťou tejto technológie. Pre túto skutočnosť je testovanie a vývoj nových receptúr s použitím staveništných aparátúr a zariadení príliš nákladný. Je však možné využiť rôzne metódy, ktoré aspoň čiastočne simulujú pochody pri striekaní betónu a sú vhodné pre laboratórne testovanie. Táto práca sa v praktickej časti zaoberá porovnaním reaktivity cementového tmelu s nealkalickou urýchľovacou prísadou pri použití rôznych prímеси a portlandských cementov od rôznych výrobcov, metódou, ktorá nepoužíva receptúru používanú na reálne striekanie, ale receptúru zvyrazňujúcu sledované parametre hydratačného procesu.

## 2 CIEĽ PRÁCE

Cieľom tejto bakalárskej práce je zhrnutie základných poznatkov o striekanom betóne so zameraním na správanie nealkalických urýchľovacích prísad a aktívnych prímiesí v striekanom betóne. V práci sú popísané základné informácie o striekanom betóne a technológii jeho výroby, požiadavky na vlastnosti striekaného betónu i na jeho zložky, popis hydratačného procesu ovplyvneného urýchľovacími prísadami.

Vysledovanie a porovnanie účinku aktívnych prímiesí, ako čiastočných náhrad cementu, na reaktivitu cementového tmelu s urýchľovacou prísadou z technologického hľadiska je úlohou experimentálnej časti bakalárskej práce. Ako aktívna prímies bude použitá vysokopecná troska, vysokoteplotný elektrárenský popolček a mikromletý vápenec. Overené bude správanie sa dvoch nealkalických urýchľovacích prísad (na báze síranu hlinitého od rôznych výrobcov) a ich reaktivita s tromi portlandskými cementami CEM I 42,5 R, taktiež od rôznych výrobcov. Priebeh hydratačného procesu na cementovej malte bude preverovaný a popisovaný na základe sledovania doby tuhnutia a tvrdnutia, ako aj testovania pevností v ťahu za ohybu a v tlaku po šiestich a dvadsiatich štyroch hodinách.

### 3 TEORETICKÁ ČASŤ

#### 3.1 STRIEKANÝ BETÓN, JEHO HISTÓRIA A POUŽITIE

##### 3.1.1 ČO JE STRIEKANÝ BETÓN

Striekaný betón, u nás známy tiež pod názvom “Torkret“ a v zahraničí ako „Shotcrete“ alebo „Sprayed concrete“, nie je svojou podstatou iný druh betónu, ale skôr technológiou jeho spracovania a aplikácie na konštrukciu. Základný princíp spočíva v hnaní betónovej zmesi vysokým tlakom do trysky a vrhaním vysokou rýchlosťou na podklad, teda na miesto budúcej konštrukcie, kde vytvára homogénnu a hutnú vrstvu. Kombinuje v sebe možnosti čerpatelných betónov, keďže pred nástrekom je dopravovaný minimálne v rámci striekacieho zariadenia rúrami a hadicami k tryske. Samotným nástrekom a dopadom na podklad zároveň dochádza k silnému zhutneniu, ktoré sa do istej miery podobá vibrolisovanému betónu. Na rozdiel od týchto spôsobov spracovania sa pri striekaní musia používať veľmi rýchlo reagujúce urýchľovacie prísady, vďaka ktorým je možné vytvárať od sklonených cez zvislé až po previsnuté konštrukcie bez často zložitého a nákladného debnenia. Musí byť však prítomná vhodná podkladná vrstva. Podľa spôsobu pridania vody do betónovej zmesi rozlišujeme dva základné druhy, a to striekanie suchou cestou, kedy sa voda pridáva až v tryske a striekanie mokrou cestou, kedy sa používa zmes namiešaná s vodou priamo v betonárni.



Obr. 1 Skúšobný blok striekaného betónu z výstavby tunela Višňové



Obr. 2 Betonáž nosných stien podzemných garáží nástrekom mokrou cestou, Dallas, Texas

Striekaným betónom sa zaoberajú Európske normy:

EN 14487-1 Striekaný betón Časť 1: Definície, špecifikácia a zhoda

EN14487-2 Striekaný betón Časť 2: Zhotovovanie

Skúšaným striekaného betónu sa zaoberajú normy radu EN 14488

### 3.1.2 HISTÓRIA STRIEKANÉHO BETÓNU

Vznik technológie striekania maltových zmesí všeobecne sa datuje od počiatku 20. storočia. Ako prvý vyvinul zariadenie na striekanie maltových zmesí suchou cestou Američan Carl Akeley. Použil ho pri výrobe modelov prehistorických zvierat pre Múzeum prírodných vied v Chicagu v roku 1907. Jeho firma Cement-Gun Company si metódu striekania zmesi piesku a cementu v roku 1911 nechala patentovať pod pojmom „Gunité“, ktorý sa dodnes používa hlavne pre striekané malty.

Pôvodne používaná zmes sa skladala z jemného kameniva a mala vysoký obsah cementu. Vďaka postupnému vývoju strojného zariadenia bolo možné používať kamenivo hrubších frakcií, a tak na odlíšenie striekaných mált od striekaných betónov vznikol názov „Sprayed concrete“, ktorý je používaný viac v Európe a názov „Shotcrete“ sa používa častejšie v Amerike. V súčasnej dobe zaužívaný názov „striekaný betón“ je všeobecným označením pre každú zmes zahŕňajúcu cement a kamenivo, ktorá je nanášaná nástrekom.

Spočiatku bola užívaná len technológia nástreku suchou cestou, a to najčastejšie na opravy železobetónových konštrukcií, čo vzhľadom na rýchly nábeh pevností predstavovalo v čase vojny široké využitie. Technológia nástreku mokrou cestou bola vyvinutá až po 2. svetovej vojne. Pôvodne bolo striekanie suchých zmesí prevládajúcou technológiou, avšak v poslednej dobe stále viac prevažuje striekanie mokrou cestou. Napríklad v Škandinávii došlo v sedemdesiatych rokoch k úplnému prechodu zo suchej technológie na technológiu mokrú. V rovnakom období sa začalo prechádzať od manuálneho spôsobu nástreku k striekaniu pomocou mechanických manipulátorov. Od sedemdesiatych rokov sa stále častejšie pridávajú do mokrej zmesi mikrosilika alebo vlákna. Dnes sa zhotovuje v celosvetovom meradle približne 70 % všetkých striekaných betónov technológiou nástreku mokrou cestou. [6]

Vďaka vývoju strojného zariadenia, prísad a skúšobných metód už súčasná technológia umožňuje vyrábať a používať striekané betóny, ktorých výsledná pevnosť v tlaku môže presahovať 80 MPa. Počas vývoja bolo preukázané, že je možné vytvoriť konštrukcie zo striekaného betónu, spĺňajúce všetky požiadavky kladené na monolitický betón. [1][3]

### 3.1.3 POUŽITIE STRIEKANÉHO BETÓNU

Schopnosť striekaného betónu vytvárať aj previsnuté tenké vrstvy a konštrukcie bez použitia obojstranného debnenia umožňuje jeho použitie na betonáž v stiesnených priestoroch, na zložité prechodové tvary medzi rôznymi prierezmi podzemných stavieb alebo všeobecne pri vytváraní nepravidelných tvarov konštrukcií podľa zámeru architektov či pri napodobeninách prírodných skalných útvarov.

Možnosti použitia striekaných betónov mimo podzemného staviteľstva:

- *nové konštrukcie:*  
škrupinové strechy, kupoly, klenby, silá, bankové trezory, oporné steny, pažiace steny, kazetové stropy, protivýbuchové steny
- *konštrukcie na zadržiavanie vody:*  
spevňovanie morských a riečnych brehov, vodné nádrže, priehrady, akvadukty, plavecké bazény, vodojemy, spevňovanie riečneho dna, zavlažovacie a odvodňovacie kanály
- *ochranné opláštenie:*  
protipožiarna ochrana oceľových konštrukcií, žiaruvzdorné „výmurovky“ pecí, potrubné obloženie, stabilizácia skalných stien a zemných svahov
- *zosilňovanie a opravy betónu* poškodeného karbonatáciou a koróziou výstuže, požiarom poškodených konštrukcií, chladiacich veží, mostov, tunelových ostení, atď.
- *nepravidelne tvarované konštrukcie:*  
bazény, lezecké steny, krajinotvorba, sochárstvo, zábavné parky, bobové a sánkarské dráhy, kanály pre vodné športy, bionické konštrukcie.

Striekaný betón má však najväčšie využitie v podzemnom staviteľstve (asi 90 % celkového objemu) pri budovaní tunelových stavieb a to predovšetkým Novou Rakúskou Tunelovacou Metódou, skrátene NRTM. Zachytávanie výrubu pri tejto metóde vyžaduje z geotechnického hľadiska dostatočne rýchly nábeh pevnosti betónu primárneho ostenia, aby prišlo k správne spolupôsobeniu primárneho ostenia s okolitým horninovým masívom. [3]

## 3.2 POŽIADAVKY NA VLASTNOSTI STRIEKANÉHO BETÓNU

Vlastnosti betónu sú determinované vlastnosťami použitých zložiek (kamenivo, cement, voda, prísady a prímеси) a ich percentuálnym zastúpením, ďalej spôsobom miešania betónovej zmesi, dopravou, ukladaním, zhutňovaním a ošetrovaním betónu.

Požiadavky na striekaný betón upravuje európska norma ČSN EN 14487-1, kapitola 5. Potvrdenie všeobecnej vhodnosti pre východzí materiál však neznamena vhodnosť v každej situácii a pre každé zloženie striekaného betónu. V striekanom betóne môžu byť použité len zložky s potvrdenou vhodnosťou pre určené použitie. Receptúry betónu musia spĺňať všetky kritériá pre čerstvý aj zatvrdnutý betón. [7]

### 3.2.1 Požiadavky na typy striekaného betónu podľa účelu použitia

Zaradenie striekaného betónu do typov zohľadňuje účel použitia striekaného betónu a jeho úloha v konštrukcii. Pre jednotlivé typy striekaného betónu sú rozdielne požiadavky na počiatočnú pevnosť a ďalšie vlastnosti, napr. vodotesnosť, odolnosť voči mrazu apod.

- *Striekany betón bez konštrukčnej funkcie SB I*

Úloha tohto striekaného betónu spočíva vo vytvorení určitej povrchovej úpravy, napr. úprava podkladu pod fóliovú izoláciu, uzatvorenie povrchu horniny, pričom sa udávajú iba najzákladnejšie požiadavky na kvalitatívne vlastnosti, napr. trieda pevnosti. [5]

- *Striekany betón s konštrukčnou funkciou SB II*

Tento typ striekaného betónu má zabezpečovaciu a podopierajúcu funkciu. Najčastejšie sa používa pri vytváraní primárnych ostení razených tunelových stavieb, na zapaženie stien stavebných jám a prírodných svahov. Pre prípad použitia tohto striekaného betónu sa určujú osobité požiadavky na vývoj pevnosti mladého betónu. Vývoj pevnosti je vymedzený oborom J1 – J3. Obory ranných pevností striekaného betónu sú vysvetlené v kapitole 3.2.2. [5]

- *Striekany betón so zvláštnou konštrukčnou funkciou SB III*

Tento druh striekaného betónu preberá trvalú statickú úlohu, napr. vnútorný plášť razených stavieb pod jestvujúcou zástavbou, jednoplášťové ostenia tunelov, stien vodných nádrží ap. Zaraďujeme sem tiež striekaný betón pre aktívne zabudovanie do stavebných dielov z betónu, železobetónu alebo muriva pozemných stavieb. Pevnostná trieda betónu sa určuje podľa normy ČSN EN 206 a obory vývoja pevnosti mladého betónu J1- J3. [5]

### 3.2.2 Pevnosti mladého striekaného betónu

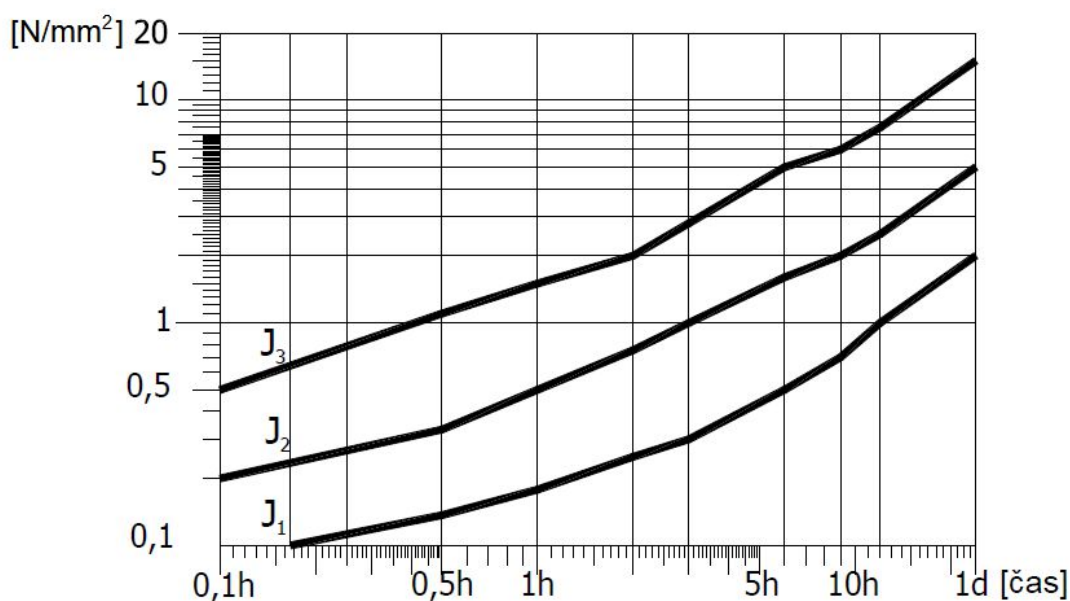
Mladý striekaný betón je definovaný ako striekaný betón max. 24 hodín po jeho nástreku. Pre požadovanú rýchlosť zrenia a vývoj pevností je nevyhnutné použitie určitého množstva urýchľovacej prísady. Druh urýchľujúcej prísady sa musí voliť s ohľadom na zníženie konečnej pevnosti oproti referenčnému betónu bez urýchľovača. Nárast pevností striekaného betónu v prvých minútach je veľmi dôležitý pre úspešnú aplikáciu striekaného betónu. V prípade, že nárast pevností je pomalý, riziko odpadnutia betónu z konštrukcie je vysoké (najmä v aplikáciách nad hlavou). Pri nástreku ďalších vrstiev je nevyhnutné dodržiavať technologické prestávky, nakoľko nastriekaná vrstva ešte nemá požadovanú súdržnosť s podkladom. Na druhej strane, veľmi rýchly vývoj pevností zapríčiňuje nedostatočné spojenie viacerých vrstiev betónu, čo spôsobuje zvýšený odraz kameniva väčších frakcií od podkladnej vrstvy. Striekané betóny klasifikujeme podľa rýchlostí nárastu ranných pevností do tried – oborov J1, J2 a J3, podľa „Smernice pre striekaný betón“ (Rakúsky betonársky spolok, 1998). Mladý striekaný betón je definovaný pevnostnou triedou J1 ak jeho závislosť pevnosti v čase spadá medzi krivky J2 a J1. Vyššie triedy sa určujú obdobne. [1] [2] [12]

Tabuľka č. 1:

Predpísané minimálne pevnosti v tlaku betónu pre obory nábehov pevností  $\text{N/mm}^2$  [1] [12]

Obory	Doba po nástreku betónu									
	6 min.	10 min.	30 min.	1 hod.	2 hod.	3 hod.	6 hod.	9 hod.	12 hod.	24 hod.
J1		0,10	0,14	0,18	0,25	0,30	0,50	0,70	1,00	2,00
J2	0,20	0,25	0,33	0,50	0,75	1,00	1,60	2,00	2,50	5,00
J3	0,50	0,75	1,10	1,50	2,00	2,80	5,00	6,00	7,50	15,00

Graf č. 1: Hraničné krivky pre jednotlivé obory nábehov pevností [1] [12]





### 3.2.3 Pevnosť zrelého striekaného betónu

Mechanické vlastnosti sú najdôležitejšími parametrami betónu všeobecne.

Jeho pevnosť vychádza z druhu použitého cementu, dávkovania, druhu a množstva kameniva, množstva zámesovej vody, a z pridaných prísad a prímiesí. Obvyklé dávkovanie bude bližšie opísané v kapitole 3.4 - Zložky striekaného betónu. Pevnosť je však ovplyvnená ešte pomerom použitia jednotlivých zložiek betónu, spracovateľnosťou, spôsobom jeho uloženia a následného ošetrovania.

Striekaný betón sa zatrieduje do pevnostných tried podľa normy ČSN EN 206. Pre klasifikáciu sa používa charakteristická pevnosť betónu v tlaku zistená na valcových skúšobných telesách, (obvykle na odvrátených jadrách priemeru 100 mm a výšky 100 mm). Trieda pevnosti sa môže vzťahovať na čas 28, 56 alebo 90 dní. Pri dobe 56 alebo 90 dní je potrebné uviesť čas vzorky do zátvorky za triedu pevnosti - napr. SB 25 (90).

Pevnosti uvedené za značkou striekaného betónu (SB), by mali byť prevádzané, pokiaľ možno na hodnotu kockovej pevnosti a mali by byť stanovené v súlade s triedami pevnosti betónu tak, ako sú uvedené v norme ČSN EN 206. K triedam pevnosti je možné stanoviť požiadavky na pevnosť v určitom čase, napríklad pevnosť po 24 hodinách, po 3 dňoch apod. Hodnoty, uvedené v tabuľke sú priemerné hodnoty najmenej z 3 vzoriek, skúšaných po 28 dňoch. V prípade, že je to možné, priebeh pevnosti v tlaku bude stanovený skúškami pevnosti v tlaku v dohodnutých intervaloch od zamiešania betónu (podľa veku betónu). V prípade, že na priebeh pevnosti je nevyhnutné zohľadniť aj vplyv prírodných podmienok, najmä nízke teploty, na ošetrovanie vzoriek by mali byť dohodnuté osobité podmienky. [1] [17] [19]

**Tabuľka č. 2: Triedy pevnosti striekaného betónu [1]**

Triedy pevnosti striekaného betónu	Priemerná hodnota pevnosti v tlaku
SB 15 (C 12/15)	15 N/mm <sup>2</sup>
SB 20 (C 16/20)	20 N/mm <sup>2</sup>
SB 25 (C 20/25)	25 N/mm <sup>2</sup>
SB 30 (C 25/30)	30 N/mm <sup>2</sup>

### 3.2.4 Trvanlivosť a životnosť

Trvanlivosťou rozumieme schopnosť betónu alebo konštrukcie odolávať účinkom prostredia, v ktorom sa nachádza, a to po celú dobu jeho predpokladanej životnosti. Vplyv vonkajšieho prostredia sa musí brať do úvahy už pri navrhovaní betónu. Trvanlivosť je podmienená súborom viacerých podmienok, predovšetkým vhodnosťou návrhu, kvalitou vyhotovenia, následnou údržbou, vzájomným spolupôsobením betónu s výstužou, ako aj jeho namáhaním v súlade s uvažovanými predpokladmi a pôsobením vonkajšieho prostredia.

Pod pojmom životnosť rozumieme obdobie, počas ktorého vlastnosti stavby spĺňajú základné požiadavky, pre ktoré bola navrhnutá. Jedná sa teda o časový úsek od uvedenia stavby do prevádzky až po stav, keď požadované vlastnosti klesnú pod prijateľné minimum. Návrhovou životnosťou sa myslí doba, počas ktorej má konštrukcia spĺňať bez zásadných opráv a investícií účel, pre ktorý bola navrhnutá, ako napr. únosnosť, stabilita, odolnosť voči rôznym vplyvom za predpokladu vykonávania bežnej údržby. Na betónovú konštrukciu môže súčasne pôsobiť aj viacero stupňov vplyvu prostredia. Výsledné pôsobenie sa potom stanoví ako ich kombinácia. Striekané betóny primárneho ostenia sa bežne navrhujú iba na dočasné statické pôsobenie, teda do vybudovania finálneho sekundárneho ostenia, čím sa myslí obdobie spravidla dvoch rokov. Striekané betóny triedy SB III sa navrhujú na podstatne dlhšiu dobu životnosti. [1] [12] [21]

### 3.2.5 Odolnosť proti priesaku vody

Požiadavky na vodonepriepustnosť striekaného betónu sú uplatňované u betónových konštrukcií s ohľadom na polohu hladiny omývajúcej a podzemnej vody, podľa rozmeru navrhovanej konštrukcie a v závislosti od jej statickej funkcie. Podľa kritérií ČSN EN 206 sa určuje tzv. odolnosť voči priesaku vody. Zvýšená vodonepriepustnosť sa preukazuje na pevnom vyzretom odvrátnom jadre zo striekaného betónu a posudzuje sa podľa noriem platných pre štandardný monolitický betón. Vodonepriepustnosť môžeme ovplyvniť niekoľkými faktormi, a to zložením betónu v závislosti od množstva a kvality cementu, určením podielu jednotlivých frakcií kameniva, stanovením maximálnej veľkosti zrna kameniva, optimalizáciou vodného súčiniteľa, ošetrovaním betónu, alebo pridaním utesňujúcich prísad. V prípade striekaného betónu záleží aj na voľbe urýchľovacej prísady a zručnosti operátora trysky. [17] [20]

### 3.2.6 Spad

Spad je časť zmesi, ktorá sa po nastriekaní neudrží na podklade a samovoľne odpadne. Rozlišujeme dva druhy spad: spad odrazom (najmä pri technológii suchého striekania a pri použití alkalických urýchľovacích prísad) a spad stečením alebo odpadnutím plastickej zmesi (vzniká najmä pri pomalom nábehu pevnosti betónu pri mokrom striekaní). Spad odrazom obsahuje väčšinou kamenivo hrubšej frakcie, ktoré potom v nastriekanej hmote chýba.

Spad zmesi je pre striekaný betón významný dodatočný nákladový faktor. Spad môže predstavovať až 35 % z celkového objemu betónu. Pri vytváraní konštrukcie sa betón začína nanášať odspodu, aby nedochádzalo k prekrytiu spadu a k zníženiu požadovaných vlastností betónu. [6] [1]

### 3.2.7 Priľnavosť

Priľnavosťou rozumieme schopnosť striekaného betónu priľnúť na povrch horniny. Povrch, na ktorý sa plánuje striekaný betón nanášať, je vhodné pre zabezpečenie jeho lepšej priľnavosti vopred očistiť. Minimálna požadovaná priľnavosť sa obvykle uvádza v hodnotách od 0,1 do 1 MPa. V prípade, že hornina nevykazuje žiadne známky priľnavosti ani po dôkladnom očistení, priľnavosť sa neuvádza. [1]

### 3.2.8 Mrazuvzdornosť

Mrazuvzdornosťou sa rozumie schopnosť betónu nasýteného vodou odolávať účinkom striedavého zmrazovania a rozmrazovania. V prípade poklesu teploty betónu pod bod mrazu začne voda v póroch zamŕzať a v dôsledku zväčšovania objemu vznikajú vnútorné napätia. Ak je pevnosť betónu menšia ako tieto napätia, vznikajú v štruktúre betónu mikrotrhliny a pri opakovanom zamŕzaní dochádza k rozpadu betónu. Hutný betón lepšie odoláva účinkom mrazu. Pôsobenie mrazu na betón je jeden z dôležitých vplyvov prostredia pre správnu špecifikáciu betónu. Norma ČSN EN 206 udáva, že striekaný betón, ktorý je vystavený vplyvom zmrazovacích cyklov je zaradený do kategórií XF1 - XF4. Striekaný betón musí spĺňať požiadavky na mrazuvzdornosť a odolnosť voči chemickým rozmrazovacím látkam podľa tejto normy. [20] [22]

### **3.2.9 spracovateľnosť a konzistencia**

Spracovateľnosťou rozumieme schopnosť čerstvého betónu správne bezo zvyšku vyplniť formu (debnenie) za pomoci vibrácií (alebo aj bez nich), bez toho, aby prišlo k zníženiu kvality betónu. Spracovateľnosť závisí na obsahu vody, frakcií kameniva (rozdelenie podľa krivky zrnitosti a tvarového indexu), množstva cementu a veku (stupni hydratácie). Spracovateľnosť však môže byť účinne zmenená pridaním chemických prísad. Zvýšenie obsahu vody či prídanie chemických prísad zlepši spracovateľnosť betónu. Nadmerné množstvo vody vedie k oddeleniu vody (tzv. bleeding) a k segregácii jednotlivých zložiek, čo zapríčiní nižšiu výslednú kvalitu betónu. Pre striekaný betón je dôležitá konzistencia čerstvo aplikovaného betónu. Príliš tekutá zmes dopadáva z podkladu a naopak príliš tuhá sa od podkladu odráža. Taktiež potrebujeme udržiavať vhodnú konzistenciu zmesi pre mokré striekanie, aby neupchávala striekacie zariadenie a bolo ju možné čerpať. [8]

### **3.5.10 Odolnosť proti chemicky agresívnemu prostrediu**

Striekaný betón odolný voči agresívnemu prostrediu musí mať predovšetkým zvýšenú hutnosť a vodonepriepustnosť. Pri stupni chemickej agresivity XA3 je nutné pri skúške vodonepriepustnosti znížiť hĺbku priesaku vody v betóne na maximálne 20 mm podľa ČSN EN 12390-8, pri predpokladanej životnosti 100 rokov. Pri zvýšenej agresivite treba použiť aj vhodné cementy (napr. síranovzdorný cement pri riziku síranovej korózie) a prípadne i prísady, ktoré preukázateľne zvyšujú chemickú odolnosť betónu (hlavne pucolánové prímеси napr. mikrosilika, vyskopecná troska alebo vysokoteplotný popolček). Pri silne vylúhujúcich prítokoch sa musí použiť kyselinovzdorné kamenivo (napr. kremičité, vápencové, dolomitické). Skúška chemickej agresivity sa vykonáva uložením vzoriek do agresívneho prostredia na určitý čas a následne je porovnávaná pevnosť, teda jej pokles. Hutné betóny majú vyššiu odolnosť voči chemickej agresivite. [2][20]

### 3.3 TECHNOLOGIA STRIEKANIA

Striekaný betón sa od tradičných hutných betónov líši nielen zložením zmesi, ale aj spôsobom aplikácie na konštrukciu. Aplikácia striekaného betónu spočíva v hnaní betónovej zmesi vysokým tlakom do trysky a vrhaním vysokou rýchlosťou na podklad, teda miesto budúcej konštrukcie, kde vytvára homogénnu a hutnú vrstvu. Po dopade zmesi na podklad musí začať tuhnutie tak aby sa zmes udržala aj na spodnej strane vodorovného povrchu. Rýchly nástup tuhnutia a nábeh pevností sa dosahuje použitím urýchľovacích prísad. Urýchľovacie prísady sa pridávajú najčastejšie až v tryske v množstvách 2 – 10 % z hmotnosti cementu. Technológia sa delí na dva základné spôsoby (cesty) podľa spôsobu pridania vody do betónovej zmesi na striekanie suchou cestou, kedy sa voda pridáva až v tryske a na striekanie mokrou cestou, kedy sa voda pridáva už pred vstupom do striekacieho zariadenia, spravidla priamo na betonárni.

#### 3.3.1 STRIEKANIE SUCHOU CESTOU

Ako bolo spomenuté v úvode, technológia striekania suchou cestou je z oboch technológií staršia, pretože pre úspešnú betonáž nie je nutné dodržiavať tak prísne opatrenia ako pri mokrom striekaní a striekací (torkrétovací) stroj pre suché striekanie je technicky jednoduchší.

Betónová zmes pre suchý spôsob striekania betónu sa dopravuje stlačeným vzduchom (prevzdušneným prúdom) hadicou od striekacieho stroja k tryske, kde sa zmiešava s vodou a nanáša sa na podkladnú plochu striekaním. Zmes vkladaná do striekacieho zariadenia môže obsahovať maximálne 5 % vlhkosti, aby nedochádzalo k upchávaniu dopravného potrubia. Pri prevádzke je treba dbať na bezchybnú tesnosť strojného zariadenia pre obmedzenie vývoja a úniku prachu. Voda sa privádza k tryske pri dostatočnom tlaku vyššom ako 4 bary, aby prišlo k dokonalému premiešaniu zmesi s vodou. Prášková urýchľovacia prísada sa pridáva do suchej zmesi pred vsypaním do striekacieho stroja. Dnes sa takmer výlučne používajú tekuté urýchľovače. Tekutá urýchľovacia prísada sa potom pridáva kontinuálne do vody privádzanej k tryske dávkovacím čerpadlom. Takéto dávkovanie je presnejšie a úspornejšie, čo vedie k vyšším konečným pevnostiam a finančným úsporám. [1] [3]

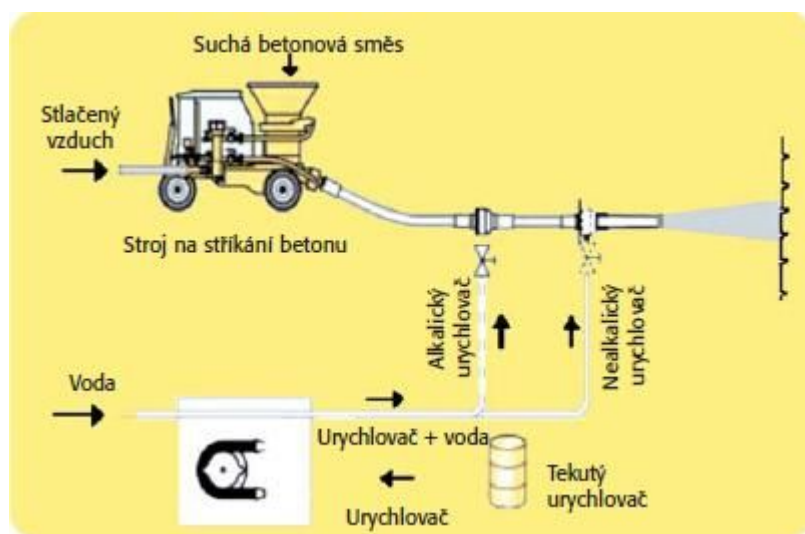
*Prednosti nástreku suchou cestou:*

- Striekacie zariadenie je technicky jednoduchšie a lacnejšie ako pri mokrom striekaní, taktiež jeho čistenie a údržba je menej náročná, keďže zmes je suchá.

- Ani pri dlhšej pracovnej prestávke zmes v striekacom zariadení nezatuhne.
- Vďaka vysokej dopravnej a výtokovej rýchlosti zmes opúšťa trysku vyššou rýchlosťou čím je hutniaci efekt pri dopade intenzívnejší.
- Väčšia maximálna dopravná vodorovná vzdialenosť, ktorá predstavuje až 300 metrov.

*Nevýhody nástreku suchou cestou:*

- Dávka zámesovej vody nie je vopred presne daná a závisí na rozhodnutí operátora trysky pri striekaní, čo má za následok väčší rozptyl konečných vlastností betónu.
- Zámes je citlivá na správnu dávku vody, keďže pri nízkom vodnom súčiniteli vzniká nadmerná prašnosť a naopak, pri vysokom vodnom súčiniteli čerstvý betón nemá dostatočnú priľnavosť na povrch a steká.
- Vysoká výtoková rýchlosť má za následok vyšší spad odrazom kameniva od povrchu a výstužných prvkov. Spad môže bežne dosahovať 30 % z celkovej hmotnosti betónu.
- Nižší hodinový striekací výkon v porovnaní s mokrým spôsobom.



Obr. 3 Schéma technológie nástreku suchou cestou [1]

### 3.3.2 STRIEKANIE MOKROU CESTOU

Betónová zmes sa pri mokrom striekaní mieša štandardným spôsobom na betonárni s kompletnou dávkou vody a dováža sa na miesto aplikácie autodomiešavačmi ako transportbetón. Výroba základnej betónovej zmesi pre striekanie mokrou cestou je bez väčších problémov zvládnuteľná výrobcami transportbetónu, avšak do úvahy je nutné brať

dopravnú vzdialenosť, na rozdiel od suchého striekania. Preto sa pri návrhu receptúr uvažuje s dobou spracovateľnosti minimálne 120 minút. Pri dlhších dopravných časoch dochádza k zmene konzistencie a správnosti funkcie urýchľovacej prísady. Do striekacieho stroja sa zmes vsypáva priamo z domiešavača a tlakom sa dopravuje potrubím alebo hadicami k tryske. [1] [3]

Mokrý spôsob nástreku sa delí na nástrek hutným prúdom a na nástrek riedkym prevzdušneným prúdom.

Hutný prúd vzniká pri doprave zmesi čerpadlom na betón so zníženou pulzáciou do trysky, kde sa zmes premiešava s urýchľovacou prísadou a zvyšuje sa výtoková rýchlosť stlačeným vzduchom.

Pre striekanie riedkym prúdom sa využíva ako dopravné médium stlačený vzduch už zo striekacieho stroja do trysky, kde je privádzaná urýchľovacia prísada. Tento spôsob je obdobný striekaniu suchou cestou.

Množstvo a tlak privádzaného stlačeného vzduchu je dôležitý faktor ovplyvňujúci priľnavosť k podkladu a zhutnenie nastriekaného betónu, čo má významný vplyv konečné parametre betónu. Správne množstvo vzduchu sa pohybuje medzi 7 – 15 m<sup>3</sup>/min pri tlaku 7 barov. [6]

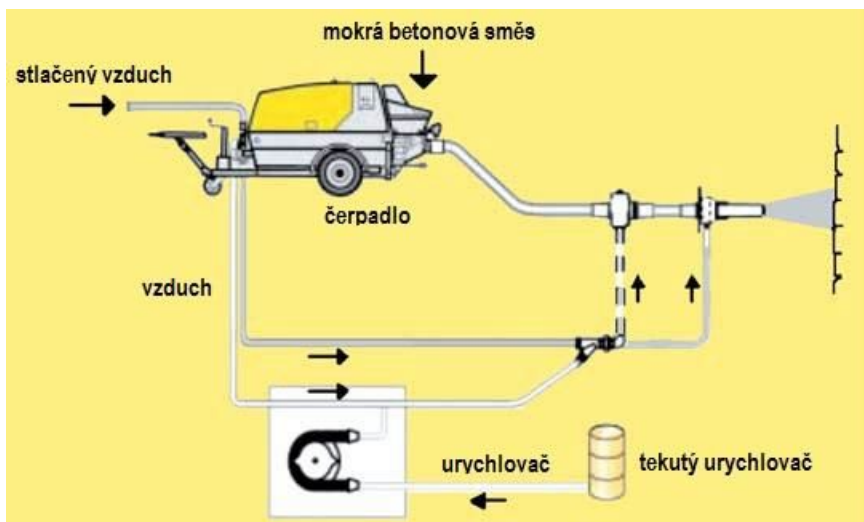
*Prednosti nástreku mokrou cestou:*

- Množstvo zámesovej vody je možné presne nastaviť a kontrolovať.
- Vhodná metóda pre možnosť použitia tekutých prísad.
- Vďaka miešaniu na betonárni je betónová zmes homogénnejšia, čo má za následok menší rozptyl výsledných vlastností striekaného betónu.
- Výrazne menší spad z dôvodu lepšej priľnavosti zmesi a nižšej výtokovej rýchlosti (oproti suchému striekaniu), ktorý tvorí 5 – 15 %.
- Minimálna prašnosť (oproti suchému striekaniu).
- Vyšší hodinový striekací výkon v porovnaní so suchým spôsobom. Priemerný denný výkon môže byť 4 – 5-krát vyšší. [6]

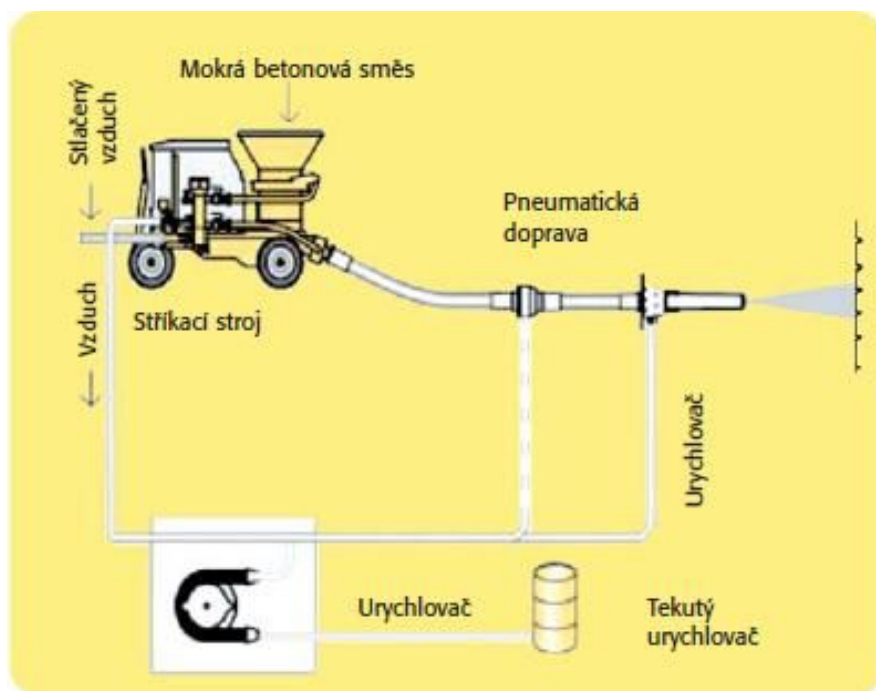
*Nevýhody nástreku mokrou cestou:*

- Striekacie zariadenie je zložitejšie a nákladnejšie.
- Vyššie nároky na kvalitu betónovej zmesi pre zabezpečenie čerpatel'nosti a účinnosti urýchľovacej prísady.

- Nižšia výtoková rýchlosť má za následok menší hutniaci účinok.
- Obmedzený čas na spracovanie namiešanej betónovej zmesi.
- Prestávky v betonáži je nutné plánovať a prerušenia obmedzovať vzhľadom na nutnosť čistenia striekacieho zariadenia.
- Menšie maximálne dopravné vzdialenosti.
- Nižšia účinnosť pri striekaní na vlhké povrchy.
- Nižšia mobilita zariadenia – príprava striekania je časovo náročnejšia.



Obr. 4 schéma technológie nástreku mokrou cestou s hutným [1]



Obr. 5 schéma technológie nástreku mokrou cestou s riedkym (prevzdušeným) prúdom [1]



## 3.4 ZLOŽKY STRIEKANÉHO BETÓNU

### 3.4.1 CEMENT

Cement je hydraulické spojivo, tj. anorganická látka, ktorá po zmiešaní s vodou v dôsledku hydratačných procesov a reakcie tuhne, tvrdne a je stála aj pod vodou. Cement vzniká pomletím slinku a prísadou regulujúcou tuhnutie, najčastejšie sadrovcom. Slinkok sa vyrába výpalom vápenca, ílu a korekčných surovín. Surovinová múčka obsahuje  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  v takom pomere aby slinkové minerály vznikali v správnom množstve a pomere.

Pre kompatibilitu cementu s urýchľovacou prísadou je dôležité množstvo, morfológia a čistota slinkových minerálov, hlavne trikalciumaluminát  $\text{C}_3\text{A}$  a trikalciumsilikát  $\text{C}_3\text{S}$ , teda alit.

Cement slúži v striekanom betóne ako spojivo. Cementy, ktoré sa používajú do striekaných betónov, musia spĺňať požiadavky, ktoré sú vyžadované normou EN 14487-1 Striekaný betón Časť 1: Definície, špecifikácia a zhoda. Tieto požiadavky uvádzajú, že do striekaných betónov je potrebné použiť cement, u ktorého je preukázaná vhodnosť podľa ČSN EN 197-1, Cement – Časť 1: Složení, špecifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Počiatok doby tuhnutia sa u týchto cementov musí pohybovať v intervale 1,5 – 4 hodiny. Jemnosť mletia by sa mala v priemere pohybovať medzi 350  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Pevnosť v tlaku po 28 dňoch zrenia normovej cementovej malty by mala vykazovať hodnotu vyššiu ako 40  $\text{N}/\text{mm}^2$ .

Typ a množstvo použitého cementu má predovšetkým vplyv na pevnosť a trvanlivosť betónu. V Česku i na Slovensku sú pre striekaný betón najčastejšie používané portlandské cementy vyšších pevností (napr. CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R), ale v niektorých prípadoch pri výstavbe tunelov boli použité zmesné cementy. Množstvo cementu je dávkované obvykle medzi 370 až 430  $\text{kg}/\text{m}^3$  betónu pre suchý proces a medzi 400 až 450  $\text{kg}/\text{m}^3$  pre mokrý proces. [1] [2] [7] [18]

### 3.4.2 KAMENIVO

Kamenivo je anorganický pevný materiál, ktorý tvorí kostru betónovej zmesi. Skladá sa z niekoľkých frakcií, ktoré spolu tvoria pevnú maticu a slúži ako plnivo. Kamenivo musí vyhovovať ustanoveniam normy a súvisiacich predpisov, platných v mieste použitia striekaného betónu a musí byť vhodné vzhľadom k požiadavkám danej aplikácie.

Pre striekaný betón SB II (konštrukčný betón) a SB III (zvláštna konštrukčná funkcia) sa používa kamenivo s maximálnym zrnom 8 mm (prípadne 11 mm), ktoré by malo byť

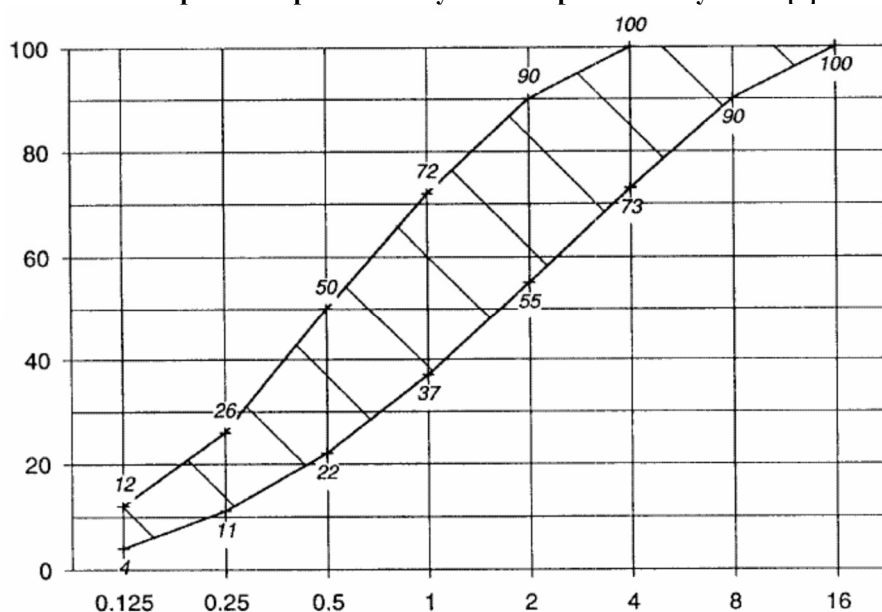
prednostne oblé prírodné ťažené, alebo iba v ojedinelých prípadoch ostrohranné drvené. Rozdelenie frakcií zŕn má byť vykonané tak, aby bol zaistený správny rozsah pásma čiary (krivky) zrnitosti. Dodržanie krivky zrnitosti kameniva je veľmi dôležité. Veľký význam má predovšetkým obsah a vlastnosti jemných frakcií kameniva. Pri použití piesku o veľkosti zŕn do 4 mm sa jedná o striekané cementové malty, pri uplatnení frakcií nad 4 mm používa označenie striekaného betónu. Ako u všetkých špeciálnych druhov betónov je kvalita použitého kameniva do striekaného betónu veľmi dôležitá. Z ekonomických dôvodov je pri návrhu receptúry všeobecne nutné vychádzať z miestne dostupného kameniva, ktoré nie je zaťažené nadmernými dopravnými nákladmi. [1][2][6]

Odporúčané medze zrnitosti kameniva podľa organizácie EFNARC sú uvedené v tab. 3 a na grafe 2. Rakúska smernica pre striekaný betón uvádza odporúčané pásmo zrnitosti posunuté mierne do hrubších frakcií.

**Tabuľka č. 3: Medze zrnitosti kameniva odporúčané pre striekaný betón [1]**

Sito [mm]	Minimálny prepád [%]	Maximálny prepád [%]
0,125	4	12
0,25	11	26
0,5	22	50
1	37	72
2	55	90
4	73	100
8	90	100
16	100	100

**Graf č. 2: Odporúčané pásmo krivky zrnitosti pre striekaný betón [1]**



### 3.4.3 VODA

Voda používaná v betóne má dvojaký význam, a to voda reologická a hydratačná. Reologická voda umožňuje vytvorenie plastickej betónovej zmesi, a tým jej spracovanie do žiadaného tvaru. Hydratačná voda je potrebná pre hydratáciu cementu a tým k vytváraniu tuhej štruktúry cementového kameňa. Zlúčenie vody s cementom vytvorí cementový tmel a následne procesom hydratácie cementový kameň. Hydratácia zahŕňa mnoho rôznych reakcií, ktoré často prebiehajú súčasne. V dnešnej dobe je možné pridávať do betónu i recyklovanú vodu, získanú recykláciou v mieste výroby betónu, avšak pri použití do striekaného betónu predstavuje značné riziko spoľahlivosti fungovania urýchľovacej prísady a výslednej kvality betónu. Ak recyklovaná voda môže obsahovať zvyšky urýchľovača, v žiadnom prípade nesmie byť použitá na striekaný betón.

Vodu pre betonárske účely rozlišujeme na zámesovú (potrebná k príprave betónu) a na ošetrovaciu (slúžiacu pri tvrdnutí betónu). Najčastejšie sa ako zámesová a ošetrovacia voda používa pitná voda z bežnej rozvodnej siete. V prípade použitia iného zdroja vody je nevyhnutné poznať jej chemické zloženie. Voda do betónu musí spĺňať požiadavky podľa normy ČSN EN 1008.

Vzájomný pomer vody a cementu je jedným z najdôležitejších faktorov pre konečnú kvalitu striekaného betónu. Celkové množstvo vody, ktoré je použité pri technológii nástrekov suchou cestou, sa skladá z vody privedenej k tryske a z vlastnej vlhkosti obsiahnutej v kamenive. V porovnaní s technológiou nástreku mokrou cestou neexistuje u suchého striekania vopred presne daná hodnota pomeru vody a cementu, pretože množstvo pridávanej vody je určované obsluhou trysky. U príliš nízkeho dávkovania vody vzniká okamžité nadmerná prašnosť. V prípade vysokého dávkovania vody neodrží nastriekaný betón na zvislom alebo na previsnutom podklade a steká dole. V prípade správneho dávkovania kolíše vodný súčiniteľ, t.j. hodnota pomeru vody a cementu, len veľmi málo a drží sa pod hodnotou 0,5 (optimálne okolo 0,35 - 0,45). Zväčšenie vodného súčiniteľa nad 0,5 je technologicky vylúčené s ohľadom na stekanie či odpadávanie nanesej zmesi zo zvislých či previsnutých plôch. V extrémnych prípadoch je možné dosiahnuť pomer vodného súčiniteľa až 0,4. Množstvo vody v striekanom betóne taktiež môže byť účinne korigované použitím niektorej z prísad upravujúcich spracovateľnosť čerstvého betónu. [1] [3] [6] [8] [14]

### **3.4.4 PRÍSADY**

Prísady do betónu sú práškové, ale väčšinou kvapalné látky, ktoré ovplyvňujú po chemickej alebo po fyzikálnej stránke vlastnosti čerstvého alebo stvrdnutého betónu. Prísady do betónu sú látky, ktoré sa vzhľadom k objemu betónu dávajú v nepatrnom množstve. Všeobecne sú za príslady do betónu považované látky, ktoré sa dávajú v množstve najviac 50 g/1 kg cementu, t.j. ich dávka nepresahuje 5 % hmotnosti cementu. Avšak dávka urýchľovacích príslad pre striekané betón môže dosahovať až 10 % z hmotnosti cementu. Urýchľovacie príslady budú detailnejšie opísane v kapitole 3.5. Pred použitím príslady pre danú receptúru striekaného betónu je nutné overiť jej kompatibilitu s urýchľovačom tuhnutia a tvrdnutia betónu. Prísladami určenými pre striekaný betón sa zaoberá norma ČSN EN 934 – 5.

#### **3.4.4.1 PLASTIFIKAČNÉ PRÍSADY**

Plastifikačné a superplastifikačné príslady sú detailne popísané v norme ČSN EN 934 – 2. V striekanom betóne sa používajú na úpravu konzistencie čerstvého betónu, čím sa zlepšuje čerpatelnosť zmesi pre mokré strikanie. Ich použitie umožní znížiť množstvo zámesovej vody, čím sa redukuje vodný súčiniteľ a zvyšuje sa konečná pevnosť. Znížením vodného súčiniteľa sa eliminuje aj riziko vzniku hydratačných trhlín a dodatočného dotvarovania betónu. Použitie superplastifikačnej príslady zabezpečuje stálosť konzistencie betónovej zmesi od pôvodného stavu až po jeho aplikáciu, čo oceníme pri technológii mokrého nástreku, keď sa betón dopravuje na miesto stavby v autodomiešavačoch. Navrhuje sa na dobu spracovateľnosti až 120 minút. Dávkovanie superplastifikačných príslad sa pohybuje v rozmedzí 0,3 – 3 % z hmotnosti cementu. Konzistencia pre čerstvý betón používaný v technológii striekaného betónu sa pohybuje v triede S4 až S5. Tieto triedy sú optimálne pre čerpanie betónu. [8] [9]

#### **3.4.4.2 OSTATNÉ PRÍSADY**

Pre nástrek suchou cestou sú niekedy používané príslady na zníženie prašnosti, ktoré sa v praxi dosiaľ príliš neosvedčili. Do striekaného betónu aplikovaného mokkým spôsobom je možné pri miešaní betónovej zmesi pridávať príslady s rôznymi účinkami, napr. spomaľovacími, prevzdušňujúcimi, stabilizačnými, odpeňovacími, hydrofobizačnými, prípadne aj príslady upravujúce ďalšie vlastnosti. Účinnosť príslad do striekaného betónu a ich vzájomnú znášanlivosť a kompatibilitu s urýchľovacom prísladou a cementom je nutné preukázať overovacími laboratórnymi a prípadne i preukaznými skúškami. [1]

### 3.4.5 PRÍMESI

Podľa normy ČSN EN 206 je prímies definovaná ako práškovitý materiál, ktorý sa pridáva do betónu za účelom zlepšenia vlastností alebo dosiahnutia špeciálnych vlastností betónu. Pod pojmom vlastnosti betónu rozumieme vlastnosti stvrdnutého betónu, napr. pevnosti, nepriepustnosť pre vodu a plyny, trvanlivosť, objemové zmeny. Pridaním prímies upravujeme tiež vlastnosti čerstvého betónu, ako je napr. konzistencia, čerpatelnosť, rozmiešavanie alebo odlučovanie vody (tzv. bleeding).

Z hľadiska veľkosti častíc je možné prímies považovať za jemné podiely tuhých častíc. Do prímies taktiež patria aj pigmenty, ktoré je možné pridávať do striekaných betónov pri špeciálnych architektonických aplikáciách za účelom zafarbenia betónov do rôznych farebných odtieňov. Prímies sa pridávajú v takom množstve, ktoré nebude pôsobiť nepriaznivo na vlastnosti betónu, a taktiež nespôsobí koróziu výstuže. V striekaných betónoch množstvo jemných podielov (častíc do veľkosti zrna 0,25 mm) by však nemalo prekročiť hodnotu 550 kg/m<sup>3</sup>. Keďže sa jedná najmä o jemné častice, ktoré na svoj povrch viažu veľké množstvo vody v pomere k svojej hmotnosti, teda zvyšujú vodný súčiniteľ a tým spôsobujú zmrazenie betónu, ako i zníženie jeho pevnosti. Tomuto javu sa dá zamedziť používaním plastifikátorov a superplastifikátorov.

Podľa chemickej inertnosti rozlišujeme dva základné druhy prímies:

- inertné prímies – druh I
- aktívne prímies – druh II

Inertné prímies sú jemnozrnné anorganické práškové látky, ktoré pôsobia inertne, t.j. nezúčastňujú sa hydratačných procesov, ale podieľajú sa na tvorbe hmoty cementového tmelu, ktorý obaľuje zrno kameniva i povrch výstuže. Tieto prímies majú pozitívny vplyv na hutnosť, priľnavosť k podkladu a vodotesnosť, pokiaľ sú správne dávkované a majú vhodnú krivku zrnitosti. K týmto prímiesiam zaraďujeme najmä kamenné odprašky, používané ako fillery a anorganické práškové farebné pigmenty. Práca sa ďalej detailnejšie zaoberá len prímiesami druhého druhu, teda aktívnymi prímiesami.

Aktívne prímies – pucolány a latentne hydraulické prímies sú látky so schopnosťou chemicky sa zúčastniť hydratačnej reakcie. Napriek tomu, že pucolány a latentne hydraulické látky sú zaradené do jednej skupiny prímies, je treba ich rozoznávať. Latentne hydraulické látky sú také, ktoré samé po zamiešaní s vodou netvrdnú a nevykazujú žiadnu väznosť. Aby sa začali

správať ako hydraulické látky, je nutné použiť aktivačnú prísadu, ktorá je taktiež obsiahnutá v portlandskom cemente, čiže nie je potrebné ju špeciálne do zmesi pridávať. Typickým zástupcom latentne hydraulickej prímеси je mletá vysokopecná troska. Pucolány sú látky amorfného charakteru (na báze amorfného  $\text{SiO}_2$ ), ktoré po rozmiešaní s vodou netuhnú, netvrdnú a samotné nevykazujú pevnosť ani po zmiešaní s aktivačnou prísadou. Vo vodnom prostredí sú schopné reakcie s vápenatými iontami  $\text{Ca}^{2+}$ , pričom vytvárajú hydratačné splodiny ktoré sú chemicky i mineralogicky obdobné ako hydratačné splodiny portlandského cementu. Táto reakcia v porovnaní s portlandským cementom je však veľmi pomalá. Zástupcami skupiny pucolánov sú napr. popolčeky a kremičité úlety. [9] [17] [23]

#### **3.4.5.1 KREMIČITÉ ODPAŠKY – MIKROSILIKA (SILICA FUME)**

Mikrosilika je najznámejším príkladom prímеси, používaných vo svete stále častejšie do striekaného betónu. Jedná sa jemnú látku s veľkou plochou povrchu ( $20\text{--}35 \text{ m}^2/\text{g}$ ) a s vysokým podielom  $\text{SiO}_2$  (medzi 65 až 97 % hmotnosti – podľa kvality výrobku). Použití mikrosiliky vedie k výraznému zlepšeniu vlastností striekaného betónu. Jedná sa najmä o vyššiu pevnosť v tlaku a vyššiu hutnosť. Vďaka zvýšeniu súdržnosti a lepivosti už v štádiu zamiešania betónovej zmesi mikrosilika umožňuje nástrek hrubších vrstiev pri porovnateľnom množstve urýchľujúcich prísad. Pri suchom spôsobe nástreku má mikrosilika ešte jeden zaujímavý efekt: pri rovnakom spôsobe pridania má použitie mikrosiliky za následok zníženie spadu až o 50 %. Mikrosilika môže byť dávkovaná buď ako suspenzia alebo v práškovej forme. Dávka pevných zložiek mikrosiliky sa obvykle pohybuje v rozmedzí 2 – 8 % hmotnosti cementu.

Kremičité odprašky vznikajú ako vedľajší produkt pri výrobe kremíka, ferosilicia a iných zliatin kremíka. Radíme ich medzi pucolány, čiže do aktívnych prímеси - druhu II. Kremičité odprašky na pohľad vyzerajú ako šedý, šedobiely a niekedy aj šedočierny veľmi jemný prášok. Na mikroskopickej úrovni by sme zistili, že sa jedná o sférické čiastočky o priemere 0,15 až 2  $\mu\text{m}$ , ktoré často tvoria aglomeráty o priemere 50  $\mu\text{m}$ . Mikrosilika je zložená najmä z amorfného, veľmi reaktívneho oxidu kremičitého ( $\text{SiO}_2$ ), ktorého množstvo sa pohybuje od 80 do 98% (podľa kvality výrobku).

Zavedení kremičitých odpraškov zmenilo revolučným spôsobom použitie striekaného betónu, pretože dovoľujú znížiť množstvo cementu a tým sa zníži zmraštenie betónu vysychaním. Značnou nevýhodou mikrosiliky však je jej pomerne vysoká cena, ktorá sa pohybuje v intervale 8000 až 9500 Kč/t. [1] [13] [23]

### 3.4.5.2 TROSKA (STRUSKA)

Vysokopecná granulovaná troska používaná ako prímies do betónu vzniká ako vedľajší „odpadový“ produkt pri výrobe surového železa vo vysokej peci – jedná sa o pretavenú hlušinu rudy s troskotvornou prísadou. Pri jej použití dochádza k výrazným energetickým i finančným úsporám a k zníženiu produkcie CO<sub>2</sub>. Pre použitie mletej granulovanej vysokopecnej trosky platí norma ČSN EN 15167-1 – Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – část 1: definice, specifikace a kritéria shody. Troska obvykle nahrádza portlandský slinok v zmesových cementoch v rozmedzí 6 až 35 %.

Pre použitie trosky v stavebníctve je dôležitý proces jej chladnutia. Trosková tavenina o teplote 1350 až 1550 °C musí byť prudko ochladená pod teplotu 800 °C, aby došlo k stuhnutiu v amorfnej fáze podobnej kremičitému sklu, čím sú zaistené jej latentne hydraulické vlastnosti. Avšak pri prudkom ochladení pod 675 °C je vysoké riziko silikátového rozpadu.

Chemické zloženie vysokopecných trosiek, rovnako ako u väčšiny druhotných surovín, je dosť premenné. Pre využitie v striekanom betóne musí byť overená kompatibilita s urýchľovačom.

Tabuľka č. 4 Obvyklé zastúpenie jednotlivých chemických zložiek vo vysokopecnej troske

Zložka	Hmot. %	Zložka	Hmot. %
CaO	30 – 50 %	FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 – 3 %
SiO <sub>2</sub>	30 – 43 %	S (vo forme S <sup>2-</sup> )	0,5 – 3 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 – 18 %	MnO	0,2 – 2 %
MgO	1 – 15 %		

Významným hľadiskom pre posúdenie akosti trosky je tzv. modul zásaditosti označovaný ako M<sub>z</sub>, ktorý vyjadruje pomer medzi zásaditými oxidmi (CaO, MgO) a kyslými oxidmi (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>); obvykle sa vyjadruje v hmotnostných percentách. Jeho hodnota totiž výrazne predurčuje využitie trosky – ak je M<sub>z</sub> menší ako 1, nie je troska vhodná do cementu.

Troska má pozitívny vplyv na pórovitosť cementového kameňa, najmä však na distribúciu gélových pórov v štruktúre pevných hydrátů vyskytujúcí se hlavne v C-S-H tobermoritickém gelu. Ako gélové póry označujeme póry o veľkosti menšej ako 0,01 μm. Môžeme teda povedať, že troska zlepšuje mrazuvzdornosť betónu, nepriepustnosť pórového systému a tým zvyšuje aj celkovú trvanlivosť takéhoto betónu.

Vysokopecné trosky sa melú tak, aby merný povrch troskového prachu (podľa Blaina) bol v rozmedzí 310 – 340 m<sup>2</sup> na kilogram. Merný povrch je potom takmer totožný ako má portlandský cement, čiže pri nahradení časti portlandského cementu vysokopecnou troskou by sa nemal vodný súčiniteľ veľmi zmeniť. Navyše prídavok trosky zlepšuje reologické vlastnosti čerstvého betónu, znižuje jej viskozitu. Oproti tomu však za zásadne negatívny účinok trosky na čerstvý betón použitý v technológii striekaného betónu je pomalší nárast pevností v tlaku i to, že negatívne ovplyvňuje krátkodobé pevnosti, i keď pevnosti dlhodobé sú vyššie. Tento jav môžeme kompenzovať, keď pomelieme trosku jemnejšie na merný povrch (podľa Blaina) okolo 620 m<sup>2</sup> na kilogram, čím sa zvýši reaktivita trosky a zlepší sa aj väzba medzi kamenivom a spojivom. Avšak troska s nevhodným chemickým a mineralogickým zložením môže výrazne znižovať účinok urýchľovacej prísady v striekanom betóne. Pred návrhom receptúry striekaného betónu s využitím trosky buď v zmesovom cemente (alebo aj ako externá prímes), je nutné overiť jej kompatibilitu s urýchľovačom a cementom. Cena trosky sa dnes pohybuje okolo 1000 až 1200 Kč za tonu. [9] [25]

#### **3.4.5.3 POPOLČEK (POPÍLEK)**

Podľa ČSN EN 450-1 je popolček jemný prášok skladajúci sa prevažne z guľatých sklovitých častíc, vznikajúcich pri spaľovaní prachového uhlia. Má pucolánové vlastnosti a skladá sa prevažne z reaktívneho SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pričom obsah aktívneho SiO<sub>2</sub> (definovaný a stanovený podľa ČSN EN 197-1) je minimálne 25 % (hmotnostných). Existuje vápenatý popolček, ktorý má obsah reaktívneho CaO väčší než 10 % (hmotnostných). Tento popolček sa až na malé výnimky ako prímes do betónu používa len veľmi málo. Ďalej existujú popolčky zo spaľovania komunálneho alebo priemyselného odpadu, ktoré vyššie uvedenej norme vôbec nevyhovujú. Preto sa budeme skôr zaoberať kremičitým popolčekom podľa ČSN EN 450-1, ktorý pochádza väčšinou z vysokoteplotného spaľovania čierneho alebo kvalitného hnedého uhlia. V ČR prevažujú skôr hnedouhoľné popolčky, nakoľko podiel čiernouhoľných popolčekov z Dětmarovic tvorí iba 20 % objemu.

Hlavným prínosom popolčekov je ich pucolánová vlastnosť, ktorá stojí za rastom pevností po 28 dňoch tvrdnutí. Značnou nevýhodou popolčekov je ich nepriaznivý vplyv na vlastnosti betónu spôsobené kolísaním ich vlastností, čomu však môžeme predísť, keď budeme odoberať popolček od jedného, stáleho dodávateľa (a najlepšie z rovnakého kotla). Ďalej môžeme popolčky triediť, aby sme dosiahli lepších (rovnomernejších) tvarových vlastností a tým i menšej vodonáročnosti. Popolčky sa ďalej aj melú, pretože z guľovitých zŕn ide hutná



mikroštruktúra vyskladať len ťažko, ale pokiaľ guľovité zrná rozpolíme alebo namelieme ešte na menšie zlomkové časti gule, pôjde vyskladať štruktúru hutnejšiu, a to i vzhľadom k zrnám ostatných zložiek v zmesi. No triedené a ďalej mleté popolčeky sú podstatne drahšie. Merný povrch popolčeku (podľa Blaina) sa pohybuje okolo 300 m<sup>2</sup>/kg, čo je zhruba rovnaká hodnota ako u bežných cementov. Behom prvého kroku pucolánovej reakcie je štruktúra SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> napadnutá a rozbitá OH iontami. Potom, čo bolo rozbité dostatočné množstvo Si-O-Si alebo Si-O-Al väzieb a silikátové a aluminátové ionty sú oddelené zo štruktúrnej siete a začínajú reagovať s hydroxidom vápenatým a vodou, dochádza ku tvorbe amorfnej kalciumsilikátaluminátovej fázy, čo zapríčiňuje tuhnutie a tvrdnutie cementovej pasty. Popolčekom teda môžeme čiastočne nahradiť portlandský cement; pri náhrade popolčeka za cement dochádza k nárastu objemu cementovej pasty a spoločne s tým i k zníženiu potreby určitého množstva kameniva, pretože pri hydratačnej reakcii s Ca(OH)<sub>2</sub> nezreagujú všetky zrná popolčeka a plnia tak funkciu plniva. Množstvo nezreagovaných zŕn popolčeka prachu závisí na množstva voľného Ca(OH)<sub>2</sub>. Popolček nemá vplyv na počiatočné pevnosti betónu, lebo hydratuje pomalšie než portlandský cement. Prvé známky hydratácie povrchu popolčeka boli zaznamenané pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie až po pár dňoch alebo týždňoch hydratácie. Vplyv popolčeka sa pozitívne prejavuje na dlhodobej pevnosti. Popolček výrazne zvyšuje odolnosť betónu voči chemickej korózii. Väčšia odolnosť je daná nižším obsahom Ca(OH)<sub>2</sub>, ktorý je spotrebovaný v hydratácii s popolčekom, a zvýšeným obsahom C-S-H produktov, vzniknutých pri hydratácii popolčeka. Týmto sa stáva betónová matrica hutnejšia a tým pádom menej priepustná pre CO<sub>2</sub> pri karbonatácii, pre SO<sub>4</sub> pri síranovej korózii a pre iné škodlivé látky. Čerstvý betón obsahujúci popolček má taktiež menší vývin hydratačného tepla. [2] [8] [24]

#### **3.4.5.4 VÁPENEC**

Vápenec je sedimentárna hornina obsahujúca viac ako 90 % kalcitu. Takto čisté vápence sa využívajú vo vápenkách na výrobu vápna, ako plnivo pri výrobe plastov, ako troskotvorná prísada pri výrobe železa, alebo na odsírenie plynu v energetických zariadeniach s vysokoteplotným režimom spaľovania. Medzi hlavných spracovateľov menej čistého vápenca patria cementárne. Pokiaľ sa bavíme o vápenci ako o prímеси do betónu, máme na mysli jemne alebo mikromletý vápenec na báze takmer čistého uhličitanu vápenatého (CaCO<sub>3</sub>). Mikromletý vápenec získame mletím drveného vápenca, kedy na jeho kvalitu má vplyv práve jemnosť mletia a granulometria. Ideálne frakcie mikromletého vápenca sú frakcie menšie ako 0,125 mm, pričom sa požaduje, aby viac ako 70 % prepadlo sítom o veľkosti oka 0,063 mm.

Takto malé zrná a ich nasiakavosť môže ovplyvniť množstvo zámesovej vody, avšak jemné častice mikromletého vápenca majú pozitívny vplyv na čerpatelnosť betónu. Mikromletý vápenec plní v spojivových systémoch hlavne funkciu plniva, ale môže sa v malej miere aj priamo podieľať na hydratačných reakciách. V tom prípade má obsah mikromletého vápenca urýchľujúci účinok na hydratáciu  $C_3S$ , pretože tu pôsobí ako nukleačné jadro pre kryštály portlanditu, čím spôsobí relatívne rýchlejší vývin počiatočných pevností betónu a to aj napriek tomu, že mletý vápenec nemá pucolánové ani latentne hydraulické vlastnosti. Pozitívny účinok mikromletého vápenca na rýchlosť hydratácie je takto celkom zrejmý.

Pevnosť betónu je ovplyvnená pevnosťou takzvanej prechodovej či tranzitnej zóny medzi cementovou matricou a zrnami kameniva. Táto zóna obsahuje viac prázdného miesta dôsledkom nedokonalého obaľovania zrn kameniva cementovým tmelom a dokonca obsahuje viac portlanditu. Kryštál portlanditu je charakteristický tým, že dorastá do pomerne veľkých rozmerov a má tendenciu byť orientovaný paralelne k povrchu zrn kameniva. Z tohto dôvodu sú tranzitné zóny menej pevné a náchylné k rozštiepeniu. Začlenením minerálnych prímiesí (ako práve napr. mikromletého vápenca) sa zvyšuje pevnosť tejto zóny. Ak pridáme do cementového tmelu mnoho jemných zrn minerálnych prímiesí, ktoré umožňujú nukleáciu kryštálov portlanditu, zabránime tým vzniku veľkých orientovaných kryštálov a vzniká tak väčšie množstvo malých a menej orientovaných kryštálov.

S prídavkom mikromletého vápenca sú spojené i nepriaznivé javy, ako napríklad tzv. riediaci efekt, ktorý v konečnom dôsledku spôsobuje zníženie dlhodobých pevností, pretože dochádza ku zníženiu hustoty aktívneho spojivového materiálu na úkor takmer inertnej prímiesi, i keď niektorí odborníci zaraďujú vápenec medzi aktívne prímiesi, pretože sa priamo podieľajú na hydratačnej reakcii. Žiaľ, v niektorých prípadoch sú produkty týchto reakcií len ťažko identifikovateľné vďaka ich semiamorfnému charakteru, čo je práve dôvod, prečo je tak ťažké mikromletý vápenec ako prímies zatriediť. Obsah vápenca v betóne tiež negatívne ovplyvňuje trvanlivosť betónu, a to hlavne v agresívnom prostredí. V dôsledku nedostatočnej sulfátovej odolnosti môže dochádzať k tvorbe thaumasitu, najmä pri nízkych teplotách pod  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (čo v podzemnom stavitelstve, kde striekaný betón najviac používame na spevnenie výrubu, je veľmi pravdepodobné). Vznik thaumasitu je sprevádzaný rozkladom C-S-H gélu, čo je ešte horšie, než vznik ettringitu, ktorý sa prejavuje iba vznikom trhlín. C-S-H gél, z ktorého thaumasit vzniká, je totiž základnou spojivovou fázou stvrdnutej cementovej pasty. Cena mletého vápenca je veľmi priaznivá (v porovnaní s inými), pohybuje sa medzi 380 a 440 Kč/t. [26] [27]

### 3.4.6 VÝSTUŽ

Všeobecne je pevnosť betónu v ťahu relatívne nízka, rádovo v jednotkách  $\text{N/mm}^2$ , a pohybuje sa okolo 5 – 20 % pevnosti v tlaku. Tento efekt spôsobuje, že sa betón takmer vždy poruší kvôli namáhaniu v ťahu aj keď je zaťažený tlakovo, keďže môžu vznikať lokálne ťahové napätia zapríčinené nepravidelným tvarom konštrukcie alebo v dôsledku zmrašťovania betónu počas tuhnutia a hydratácie. Praktickým dôsledkom tohoto faktu je, že aj tlačené betónové prvky musia byť vystužené vložkami (prútmi, sieťami, vláknami) prenášajúcimi ťah.

Výstužná armatúra a zabudovávané oceľové prvky (oceľové priehradové oblúky, oceľové profily, styčné plechy, apod.) musia byť dostatočne upevnené, pretože pri nástreku môže dochádzať k ich kmitaniu, čo má za následok spad čerstvej betónovej zmesi. Použitie oceľovej výstuže má vplyv na voľbu druhu a množstva urýchľovacej prísady, a to hlavne v nadväznosti na požadovanú trvanlivosť konštrukcie. Ako vyplýva aj z pozorovania pri vykonávaní laboratórnych skúšok (v rámci tejto práce), urýchľovacie prísady na báze síranu hlinitého preukázateľne spôsobovali koróziu ocele v kontakte s testovanou zmesou. [1]

Pre zlepšenie vlastností striekaného betónu môžu byť použité oceľové alebo syntetické vlákna. Prínos oceľových vlákien pozorujeme v obmedzení vzniku trhlín vplyvom zmrašťovania betónu a vo zvýšení húževnatosti a odolnosti voči účinkom dynamického zaťaženia betónu. Oceľové vlákna sú buď priame, alebo tvarované z drôtu ťahaného za studena. Menej často sa používajú vlákna strihané z oceľového plechu. Najčastejšie sa používajú oceľové drôtky o dĺžke 25 – 35 mm. Drôtky, ktoré pri dávkovaní majú tendenciu k vytváraniu ťažko oddeliteľných zhlukov, sú pre použitie v strikanom betóne nevhodné. Používanie oceľových vlákien pri nástreku suchou cestou nie je príliš obvyklé. Hlavným dôvodom je predovšetkým vysoký spad a nerovnomerné rozptýlenie drôtikov.

Z ponuky syntetických polymérových vlákien sú najčastejšie používané najmä vlákna polypropylénové, ktoré zvyšujú protipožiarnu odolnosť striekaného betónu. Polymérové vlákna majú taktiež ďalší pozitívny efekt – obmedzujú vznik mikrotrhlín, avšak iba pri počiatočných fázach tvrdnutia betónu, kým je ešte ich modul pružnosti porovnateľný s okolitým betónom. Syntetické vlákna musia byť dostatočne jemné, aby sa rozptýlili v betóne pri použití bežných miešačiek a mohli byť striekané bežnými striekacími zariadeniami. [1]

Vlákna často zvyšujú potrebu zámesovej vody, čo má vplyv na konečné pevnosti a ich výstužný účinok. V žiadnom prípade však nemôžu úplne nahradiť klasické výstužné prvky.

### 3.5 URÝCHĽOVANIE HYDRATAČNÉHO PROCESU V STRIEKANOM BETÓNE

Ako bolo niekoľko krát spomenuté, v technológii striekaných betónov, pre úspešné uskutočnenie nástreku ako takého, je nevyhnutný rýchly nástup tuhnutia a nábeh počiatkových pevností. Vyžaduje sa, aby počiatok tuhnutia nastal rádovo v minútach po dopade na podklad a hydratačný proces pokračoval nadobúdaním pevnosti, obzvlášť v podzemnom staviteľstve pri razení tunelov pomocou NRTM, kde je podmienkou bezpečného postupu prác. Túto požiadavku v drvivej väčšine prípadov neje možné doceliť bez použitia urýchľovacích prísad. Na druhej strane je nutné mať na pamäti nepriaznivý dopad urýchľovacích prísad, a urýchľovania hydratácie betónu všeobecne, na konečné pevnosti betónu v extrémnych prípadoch až o 50 %. [10]

#### 3.5.1 URÝCHĽOVACIE PRÍSADY

Urýchľovacie prísady používané v striekanom betóne skracujú dobu tuhnutia a tvrdnutia, čo znamená rýchlejší nárast počiatkových pevností, umožňujú tak betonáž na previsnutých plochách nad hlavou. Ďalším ich efektom je bleskové zníženie konzistencie, ktoré nastáva v rádoch sekúnd, dokonca ešte pred dopadom na podklad vo vzduchu po opustení trysky. [6] Z tohoto dôvodu sa urýchľovač dávkuje až v tryske, keďže účinkovať začína okamžite po kontakte s vlhkou betónovou zmesou. Tento efekt bol pozorovaný aj pri výrobe skúšobnej zmesi v rámci tejto práce.

Počas vývoja technológie striekaných betónov bolo vyvinutých a používaných mnoho druhov urýchľovacích prísad na rôznej báze. Poznáme urýchľovače na báze chloridu vápenatého, uhličitanov, silikátov, hlinitanov, hydroxidov alkalických kovov, síranov, a organických látok. Podľa druhu hlavnej účinnej látky sa urýchľovacie prísady delia na alkalické a nealkalické. [11]

**Tabuľka č. 5 Porovnanie základných vlastností alkalických a nealkalických urýchľovačov [11]**

Vlastnosť	Nealkalický urýchľovač	Alkalický urýchľovač
Pracovné prostredie	menej prašné	veľmi prašné, riziko chemických popálenín
Technologické vlastnosti	menší spad, vyššie konečné pevnosti, nízka pórovitosť	veľký spad, extrémne rýchli nástup tuhnutia, zníženie konečných pevností, vysoká pórovitosť
Priemerný obsah alkálií	< 0,2 %	< 25 %
pH prísady	4 - 6	11 – 13+

### **3.5.1.1 UHLIČITANY A HYDROXIDY KOVOV ALKALICKÝCH ZEMÍN**

Uhličitany a hydroxidy kovov alkalických zemín v práškovej forme sú používané výlučne pri striekaní suchou cestou. Pridávajú sa v dávkach 2,5 – 6 % z hmotnosti cementu. Tieto prísady pôsobia urýchľujúcim účinkom hlavne na hydratáciu  $C_3S$ . Pre merateľný účinok na zvýšenie počiatočných pevností do 20 minút po zamiešaní je nutné použiť relatívne vysoké dávky tejto urýchľovacej prísady. Jej reaktivita je veľmi ovplyvnená chemickým zložením, jemnosťou mletia, a mineralogickým zložením cementu. Taktiež teplotou zložiek zmesi, okolitého prostredia. Charakteristickou vlastnosťou týchto urýchľovacích prísad je drastické zníženie konečnej pevnosti v porovnaní s neurýchľovaným betónom. 28-dňová pevnosť v tlaku typicky klesá o 30 – 40 %, v extrémnych prípadoch až o 50 %. [10]

### **3.5.1.2 ALKALICKÉ SILIKÁTY (VODNÉ SKLO)**

Urýchľovacie prísady na báze sodných a draselných silikátov sa používajú hlavne pri striekaní mokrou cestou. Do zmesi sa pridávajú v tekutej forme. Pre dostatočný urýchľovací účinok sa dávka musí pohybovať vo veľmi vysokých hodnotách, často nad 10 % z hmotnosti cementu. Avšak pri ďalšom zvyšovaní dávky sa znižuje príľnavosť betónu k podkladu a dochádza k poklesu konečných pevností vplyvom veľkého zmraštenia vysychaním. Podľa rakúskej smernice pre striekaný betón je maximálna dávka týchto prísad 15 %, kedy spôsobujú veľmi silné zníženie konečnej pevnosti. Pri použití modifikovaných sodných silikátov v dávke 4 – 6 % sa po pridaní na betónovej zmesi sa objaví zvýšená lepivosť do 10 sekúnd, avšak ďalej nemá účinok na počiatočný hydratačný proces. Výhodou týchto urýchľovacích prísad je kompatibilita so všetkými druhmi cementu, menšia chemická agresivita pracovného prostredia a nižší obsah alkálií. Avšak tieto prísady neposkytujú dostatočné počiatočné pevnosti pri akceptovateľnom poklese konečných pevností. [10]

### **3.5.1.3 SODNÉ A DRASELNÉ HLINITANY**

Urýchľovacie prísady na báze hlinitanov v tekutej forme sa používajú v technológií suchého aj mokrého striekania. Dávka prísady sa pohybuje v rozmedzí 2,5 – 5,5 % z hmotnosti cementu. Urýchľovače na báze hlinitanu draselného poskytujú všeobecne lepšie výsledky ako urýchľovače na báze hlinitanu sodného, sú avšak finančne náročnejšie. Alkalické hlinitany sa vyznačujú veľmi silným účinkom na skracovanie doby tuhnutia. Reakciou s sadrovcovým regulátorom tuhnutia zabraňuje tvorbe ettringitu, a tak umožňuje takmer okamžitú hydratáciu trikalciúmsilikátu  $C_3A$  z cementu. Efektivita urýchľovacieho účinku je závislá na chemickom

zložení, jemnosti mletia, a mineralogickom zložení cementu, avšak nie tak výrazne ako v prípade urýchľovacích prísad na báze uhličitanov. Tieto urýchľovacie prísady na báze alkalických hlinitanov poskytujú veľmi rýchle tuhnutie a nábeh pevností čo umožňuje nástrek hrubých vrstiev betónu aj na previsnuté plochy nad hlavou. Na druhej strane majú mnoho nevýhod. Spôsobujú pokles konečnej pevnosti betónu v tlaku o 20 – 25 %. Vysoký obsah alkálií a vysoké pH predstavuje nadmerné zdravotné riziko pri výstavbe podzemných tunelových stavieb. Extrémne rýchly nástup tuhnutia spôsobuje vysoký spad odrazom. Vysoký obsah alkálií je rizikovým faktorom pre možnú alkalicko-kremičitú reakciu kameniva. [10]

#### **3.5.1.4 PRÁŠKOVÉ NEALKALICKÉ URÝCHĽOVACIE PRÍSADY**

Nealkalické urýchľovacie prísady v práškovej forme boli po prvýkrát v striekanom betóne použité na začiatku 90-tych rokov. Najčastejšie sa jedná o prísady na báze hlinitanu vápenatého, ktoré sa používajú v dávkach 6 – 12 %. Ich fungovanie sa výrazne líši od fungovania alkalických urýchľovacích prísad. Skrátenie začiatku doby tuhnutia je spôsobené reakciou urýchľovača s vodou bez priamej interakcie s hydratáciou cementového tmelu. Zvýšenie počiatkových pevností sa väčšinou prejaví až pri dávke nad 7 %. Pri aplikácii striekaného betónu na previsnuté plochy pri betonáži tunelových ostení je nutné použiť vysoké dávkovanie prísady, čo á za následok zníženie konečných pevností. Toto zníženie je však nižšie ako pri použití alkalických urýchľovačov. Pri ich používaní je nevýhodou ich náchylnosť na vlhkosť. Na kompenzáciu tejto nevýhody sa na dávkovač inštaluje sušiacie zariadenie.

V striekanom betóne je možné použiť úplne bezalkalické urýchľovacie prísady, ktoré sú na báze hydroxidu hlinitého alebo síranu hlinitého. Na vyvolanie dostatočného zvýšenia počiatkových pevností stačí relatívne nízke dávkovanie približne na úrovni 4 %. Pri dávkach až do 8 % sa nepozoruje výrazné zníženie konečných pevností, ktoré nastáva pri dávkach nad 10 %. Napriek spomenutým výhodám má využitie týchto prísad obmedzenie kvôli ťažkostiam pri dosiahnutí dostatočnej homogenizácie v zmesi striekaného betónu. [10]

### 3.5.1.5 TEKUTÉ NEALKALICKÉ URÝCHĽOVACIE PRÍSADY

Používaním tekutých nealkalických urýchľovacích prísad sa vyriešia klasické problémy spojené s používaním alkalických urýchľovačov, ako napr. vysoké riziko alkalicko-kremičitej reakcie, zdravotne nebezpečné pracovné prostredie pri výstavbe tunelov z dôvodu extrémne vysokého pH alebo zvýšený spad odrazom a prašnosť z dôvodu prudkého urýchlenia tuhnutia. Oproti alkalickým urýchľovačom nealkalické urýchľovacie prísady nespôsobujú výrazný pokles konečných pevností betónu. Tento typ urýchľovačov nespôsobuje zjavné zmeny v morfológii hydratačných produktov cementu. Tieto chemikálie majú pH medzi 3 – 5,5 a obsah alkálií pod 0,3 %. Typické dávkovanie je 3 – 10 % z hmotnosti cementu. Pri použití vhodného množstva je možné dosiahnuť nábeh počiatočných pevností spadajúcich do tried J2 až J3 podľa rakúskej smernice pre striekaný betón a umožňujú tak nástrek betónu na previsnuté plochy v hrúbkach až 300 mm. Dôležitou vlastnosťou týchto urýchľovacích prísad je, že nespôsobujú zníženie konečnej pevnosti v porovnaní s referenčným betónom bez urýchľovača. Síran hlinitý, ktorý je základom mnohých dnes používaných urýchľovačov pri hydratácii reaguje s  $C_3A$  a so sadrovcom a veľmi silno podporuje vznik ettringitu, čím sa urýchľuje tuhnutie. Síran hlinitý ďalej podporuje hydratáciu  $C_3S$  a vznik C-S-H fáz. [6] [10] [28] [11]

### 3.5.1.6 STRIEKANÉ BETÓNY BEZ URÝCHĽOVACEJ PRÍSADY

Pre suché striekanie je možné použiť cementy bez sadrovca, prísady regulujúcej tuhnutie. Takýto cement po zmiešaní s vodou okamžite tuhne a tvrdne, následkom extrémne vysokej rozpustnosti a hydratačnej rýchlosti slinkového minerálu trikalciumaluminátu  $C_3A$ . Avšak vzhľadom na relatívne nízke objemy betonáží suchou cestou sú takéto cementy zriedkavo vyrábané, čo zvyšuje ich cenu a teda ich použitie je značne neekonomické.

### 3.5.2 FAKTORY OVPLYVNÚJÚCE FUNKCIU URÝCHĽOVACEJ PRÍSADY

Na funkciu urýchľovacej prísady majú vplyv mnohé okolnosti, ako napríklad chemické zloženie, jemnosť mletia, a mineralogické zloženie cementu. Vlastnosti regulujúcej prísady, teda sadrovca nie je možné úplne ignorovať, pretože napríklad zmena prírodného sadrovca za energosadrovec môže spôsobiť značné problémy. Ďalej hodnota vodného súčiniteľa, a taktiež teplota prostredia a zložiek zmesi. Spomaľujúci vplyv prísad a prímiesí môže byť tiež dosť značný. Bohužiaľ poznatky v tejto oblasti buď neboli zatiaľ publikované alebo nie sú jednoducho prístupné, teda ak vôbec existujú, keďže sa jedná o zložitý problém.

## 4 PRAKTICKÁ ČASŤ

Úlohou v experimentálnej časti bakalárskej práce bolo z technologického hľadiska sledovať a porovnať účinok aktívnych prímiesí, ako čiastočných náhrad cementu, na reaktivitu cementového tmelu s urýchľovacou prísadou. Overované bolo správanie 2 nealkalických urýchľovacích prísad na báze síranu hlinitého od rôznych výrobcov a vplyv 3 portlandských cementov CEM I 42,5 R, taktiež od rôznych výrobcov. Bol použitý jeden druh plastifikačnej prísady. Pomery zložiek boli v jednotlivých receptúrach konštantné, avšak dávka zámesovej vody bola upravovaná pre dosiahnutie rovnakej konzistencie. Reaktivita a priebeh hydratačného procesu boli popisované na základe doby tuhnutia a tvrdnutia a pevností v ťahu za ohybu a v tlaku po 6 a 24 hodinách na malte.

Doby tuhnutia a tvrdnutia boli stanovované pomocou Vicatovho prístroja.

Pevnosť v ťahu za ohybu a pevnosť v tlaku po 6 a 24 boli hodinách stanovované na maltových skúšobných telesách o rozmeroch 40x40x160 mm.

### 4.1 METODIKA

Technológia striekaného betónu vyžaduje veľmi špecifické zaobchádzanie pri ukladaní. Striekacie zariadenie, ktoré ženie betónovú zmes do trysky je nevyhnutou a technicky najnáročnejšou súčasťou tejto technológie. Simuláciu procesu striekania nie je možné vo všetkých aspektoch uskutočňovať v laboratórnych podmienkach. Je však možné využiť rôzne metódy vhodné pre laboratórne testovanie na určité naznačenie fungovania danej kombinácie použitých vstupných surovín.

#### 4.1.1 SKÚŠKA REAKTIVITY CEMENTOVÉHO TMELU S URÝCHĽOVACOU PRÍSADOU

Najdôležitejšou vlastnosťou pre úspešnú aplikáciu striekaného betónu je doba tuhnutia, tvrdnutia a nábeh počiatočných pevností, ktoré závisia na reaktivite cementového tmelu s urýchľovacou prísadou. Skúška reaktivity sa vykonáva pred návrhom finálnej receptúry striekaného betónu, hlavne pre určenie kompatibility cementu, prísad a prímiesí.

Túto skúšku nevyžaduje ani nepopisuje žiadna norma. Postup nie je presne určený a je ho možné upraviť pre získanie preukáznejších výsledkov. Pre účely tejto skúšky je možné použiť metódu stanovenia doby tuhnutia podľa EN 196-3 a/alebo metódu stanovenia pevností podľa EN 196-1. Ďalší možný postup popisuje Rakúska smernica pre striekaný betón. [12] [15] [16]



#### 4.1.2 POSTUP SKÚŠKY REAKTIVITY POUŽITÝ V TEJTO PRÁCI:

*Použité laboratórne vybavenie a pomôcky:*

Normová miešačka, manuálny Vicatov prístroj s ihlou (300g), prstenec, podložka, ocelové trojformy, váhy s presnosťou 0,01 g, normový hutniaci stolík, striasací stolík na zistenie konzistencie malty, stopky, posuvné meradlo, misky, odmerné valce, špachtle a lopatky

*Postup výroby :*

- Navážiť všetky zložky podľa receptúry s presnosťou na 0,05 g.
- Do miešačky vložiť cement, prímes, vodu a plastifikátor a miešať 30 sekúnd.
- Počas ďalších 30 sekúnd ručne dokonale rozmiešať vzniknuté zhluky.
- Pridať 1350 g piesku (normový piesok nebol použitý) a miešať 60 sekúnd.
- 90 sekúnd nechať odležať, počas tejto doby zotrieť zmes zo stien a metly.
- Zamiešať 30 sekúnd.
- Zmerať konzistenciu malty rozliatím (podľa normy EN 196-1), pre úpravu konzistencie pridať vodu, rozliatie bolo udržiavané na hodnote  $22 \pm 1$  cm.
- Počas miešania v miešačke pridať urýchľovaciu prísadu a miešať maximálne 15 sekúnd.
- Pri prvom kontakte spustiť stopky, pre presné stanovenie doby tuhnutia a tvrdnutia.
- Miešaciu nádobu vybrať z miešačky, ručne premiešať a okamžite plniť buď prstenec Vicatovho prístroja pre stanovenie doby tuhnutia a tvrdnutia alebo formu na výrobu skúšobných telies (trámčekov) na hutniacom stolíku. Skúšobné vzorky musia byť správne zhutnené a zhomogenizované, avšak pre efekt okamžitého zníženia konzistencie sa ukázalo ako vhodné ukončiť hutnenie maximálne 90 sekúnd od pridania urýchľovacej prísady do zmesi.



Obr. 6 Použitá normová miešačka



Obr. 7 Vicatov prístroj a prstenec

*Postup stanovenia doby tuhnutia a tvrdnutia:*

- Naplnený prstenec na položke vložíme pod Vicatov prístroj s vynulovanou stupnicou
- Ihlu priložíme k povrchu skúšobnej malty a zaistíme pohyblivú časť v tejto polohe
- Po uplynutí 2 minút od pridania urýchľovača do zmesi uvoľníme pohyblivú časť a ihlu necháme voľne vnikat' do zmesi.
- Jednotlivé vpichy opakujeme v intervale 1 minúty, po 20 minútach od pridania urýchľovača do zmesi interval predĺžime na 2 minúty a po 30 minútach na 5 minút. Dbáme nato aby vpichy boli vždy na inom mieste.
- Dobu počiatku tuhnutia stanovíme ako čas kedy sa ihla po prvý krát zastavila 3 – 5 mm od povrchu podložky. [12]
- Po stanovení doby tuhnutia prstenec otočíme sponou plochou nahor pre stanovenie doby konca tuhnutia, teda začiatku tvrdnutia.
- Vpichy vykonávane rovnakým spôsobom, ale tentoraz meriame hĺbku vniku ihly.
- Dobu počiatku tvrdnutia stanovíme ako čas kedy ihla po prvý krát vnikla do povrchu malty maximálne 1 mm [12]



Obr. 8  
Skúšobný hydraulický  
lis použitý pre  
stanovenie pevností



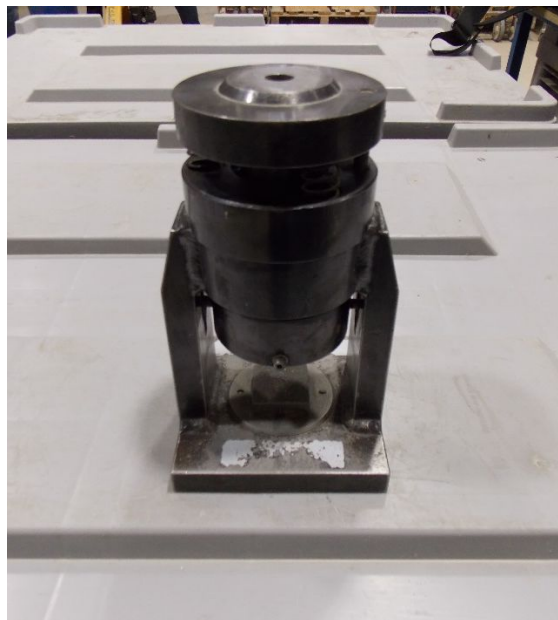
Obr. 9  
Použité oceľové  
trojformy s čerstvými  
skúšobnými telesami  
o rozmeroch  
40x40x160 mm

*Postup stanovenia počiatocnej pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku:*

- Z každej receptúry sa zhotoví 6 vzoriek (skúšobné telesá o rozmeroch 40x40x160 mm).
- Po zhutnení nevytvrdnuté vzorky označíme a uložíme v prostredí laboratória zo stabilnou teplotou na 6 alebo 24 hodín.
- Po vytvrdnutí vzorky odformujeme. Pre zabránenie porušenia vzoriek musí byť forma pred plnením ošetrovaná oddebňovacím prostriedkom a odformovanie vykonať tesne pred skúšaním v lise.
- Vzorky zvážíme a stanovíme výšku  $h$  kolmo na smer hutnenia, šírku  $b$  a dĺžku  $L$ . Každý rozmer určíme ako aritmetický priemer z 3 merní.
- Stanovíme maximálnu silu pri porušení vzorky zaťažovaním v skúšobnom lise cez normový nástavec na stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu pre 3-bodový ohyb so vzdialenosťou podpier 100 mm.
- Na zlomkoch stanovíme maximálnu silu pri porušení vzorky zaťažovaním v skúšobnom lise cez normový nástavec na stanovenie pevnosti v tlaku s tlačnou plochou 1600 mm<sup>2</sup>.
- Deštruktívne skúšanie sa vykoná na troch vzorkách 6 hodín  $\pm$  10 minút a na ďalších troch vzorkách 24 hodín  $\pm$  10 minút po pridaní urýchľovacej prísady do zmesi.
- Vypočítame pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku vzoriek.



Obr. 10 Normový nástavec na stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu pre 3-bodový ohyb so vzdialenosťou podpier 100 mm



Obr. 11 Normový nástavec na stanovenie pevnosti v tlaku s tlačnou plochou 1600 mm<sup>2</sup>

## 4.2 POUŽITÝ MATERIÁL

Materiály použité v tejto práci boli zvolené na základe dostupnosti a ich častého používania v praxi. Všetky materiály použité v tejto práci sú vedené v prehľadnej tabuľke.

Tabuľka č. 6 Prehľad použitých materiálov

Materiál	Použitý produkt
Cementy	CEM I 42,5 R Mokrý (Českomoravský cement, a.s.)
	CEM I 42,5 R Hranice (Cement Hranice a.s.)
	CEM I 42,5 R Prachovice (CEMEX Czech Republic, s.r.o.)
Urýchľovacie prísady	MasterRoc SA 183 (BASF)
	Mapequick 043 FFG (SBE) (MAPEI)
Plastfikačná prísada	Sika ViscoCrete-2700 (SIKA)
Prímesi	Veľmi jemne mletá granulovaná troska SMŠ 400 (KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.)
	Hnedouhoľný popolček (Elektráreň Chvaletice)
	Mikromletý vápenec
Kamenivo	Drobné ťažené kamenivo prané 0-4 Žabčice (ZEPIKO spol. s r.o.)
Voda	Vodovod Brno

### Príprava materiálu

Všetky použité zložky okrem vody boli pred výrobou skúšobných vzoriek vytemperované na teplotu laboratória  $20 \pm 1$  °C. Voda bola odoberaná priamo z vodovodnej výtokovej armatúry v laboratóriu Ústavu THD a takmer bezprostredne použitá na výrobu skúšobných vzoriek. Teplota vody bola teda závislá na teplote vody v prírodnom potrubí.

Kamenivo bolo pred použitím zbavené nadsitných podielov (nad 4 mm) a vysušené voľne v prostredí laboratória do tzv. vzduchosuchého stavu. Vzhľadom na množstvo a časovú náročnosť kamenivo nebolo sušené v sušiarňi.

### 4.3 ZLOŽENIE SKÚŠOBNÝCH RECEPTÚR

Použitá receptúra sa odvíjala od receptúry na stanovenie pevnosti cementu na malte podľa normy ČSN EN 196 – 1, avšak bola upravená znížením vodného súčiniteľa a použitím prímies ako čiastočnej náhrady cementu. Boli testované všetky kombinácie cementov, prímies a urýchľovacích prísad, čo znamená celkovo 24 rôznych kombinácií.

Percentuálne hmotnostné náhrady cementu prímiesami, činili pre trosku a popolček 25 % a pre mikromletý vápenec 15% z hmotnosti cementu. Hodnoty percentuálnych náhrad boli navrhnuté po konzultácii s vedúcim práce.

**Tabuľka č. 7 Hmotnostné navážky zložiek pre použité receptúry**

Zložka	Navážka		
	Referenčná zmes	Zmes s prímiesou trosky alebo popolčeka	Zmes s prímiesou mikromletého vápenca
Cement CEM I 42,5 R	450 g	337,5 g	382,5 g
DTK Žabčice 0-4	1350 g	1350 g	1350 g
Prímies		112,5 g (25 %)	67,5 g (15 %)
Voda (približne)	220 ml	220 ml	220 ml
Plastifikačná prísada (1,2 % z m <sub>c</sub> )	5,4 g	4,05 g	4,59 g
Urýchľovacia prísada (8 % z m <sub>c</sub> )	36 g	27 g	30,6 g

**Tabuľka č. 8 Prehľad všetkých testovaných kombinácií cementov, prímies a urýchľovacích prísad**

MasterRoc SA 183 (BASF)	Ref. (θ)	Troska (S)	Popolček (V)	Vápenec (LL)
CEM I 42,5 R Mokrú	M - θ - B	M - S - B	M - V - B	M - LL - B
CEM I 42,5 R Hranice	H - θ - B	H - S - B	H - V - B	H - LL - B
CEM I 42,5 R Prachovice	P - θ - B	P - S - B	P - V - B	P - LL - B
Maapequick 043 FFG (MAPEI)	Ref. (θ)	Troska (T)	Popolček (V)	Vápenec (LL)
CEM I 42,5 R Mokrú	M - θ - M	M - S - M	M - V - M	M - LL - M
CEM I 42,5 R Hranice	H - θ - M	H - S - M	H - V - M	H - LL - M
CEM I 42,5 R Prachovice	P - θ - M	P - S - M	P - V - M	P - LL - M



## 4.4 VÝSLEDKY LABORATÓRNYCH SKÚŠOK

V nasledujúcich tabuľkách a grafoch sú uvedené zistené hodnoty pri laboratórnom testovaní. Pre jednoduchosť sú v tabuľkách a grafoch uvedené použité cementy podľa miesta ich výroby, keďže sa vo všetkých prípadoch jedná o portlandské cementy CEM I 42,5 R. ďalej sú zjednodušene uvedené použité urýchľovacie prísady podľa výrobcu, keďže sa v oboch prípadoch jedná o nealkalické urýchľovače na báze síranu hlinitého.

### 4.4.1 DOBY TUHNUTIA A TVRDNUTIA

Pre jednoduchosť je vo výsledkoch doba tuhnutia označená ako „začiatok“ tuhnutia a doba začiatku tvrdnutia ako „koniec“ tuhnutia.

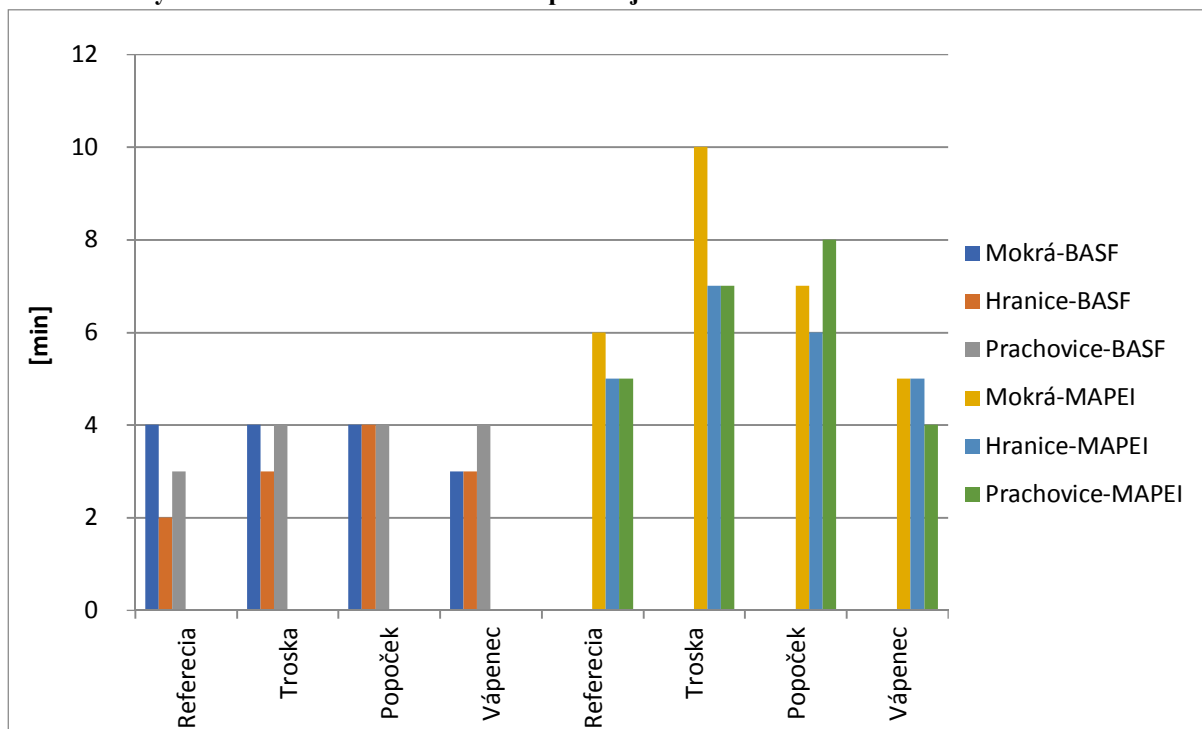
Tabuľka č. 9 Súhrn stanovených dôb začiatku a konca tuhnutia v minútach

[min]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popolček		15% Mikro. vápenec	
BASF	začítok	koniec	začítok	koniec	začítok	koniec	začítok	koniec
Mokrú	4	13	4	18	4	20	3	10
Hranice	2	12	3	22	4	35	3	18
Prachovice	3	15	4	30	4	40	4	28

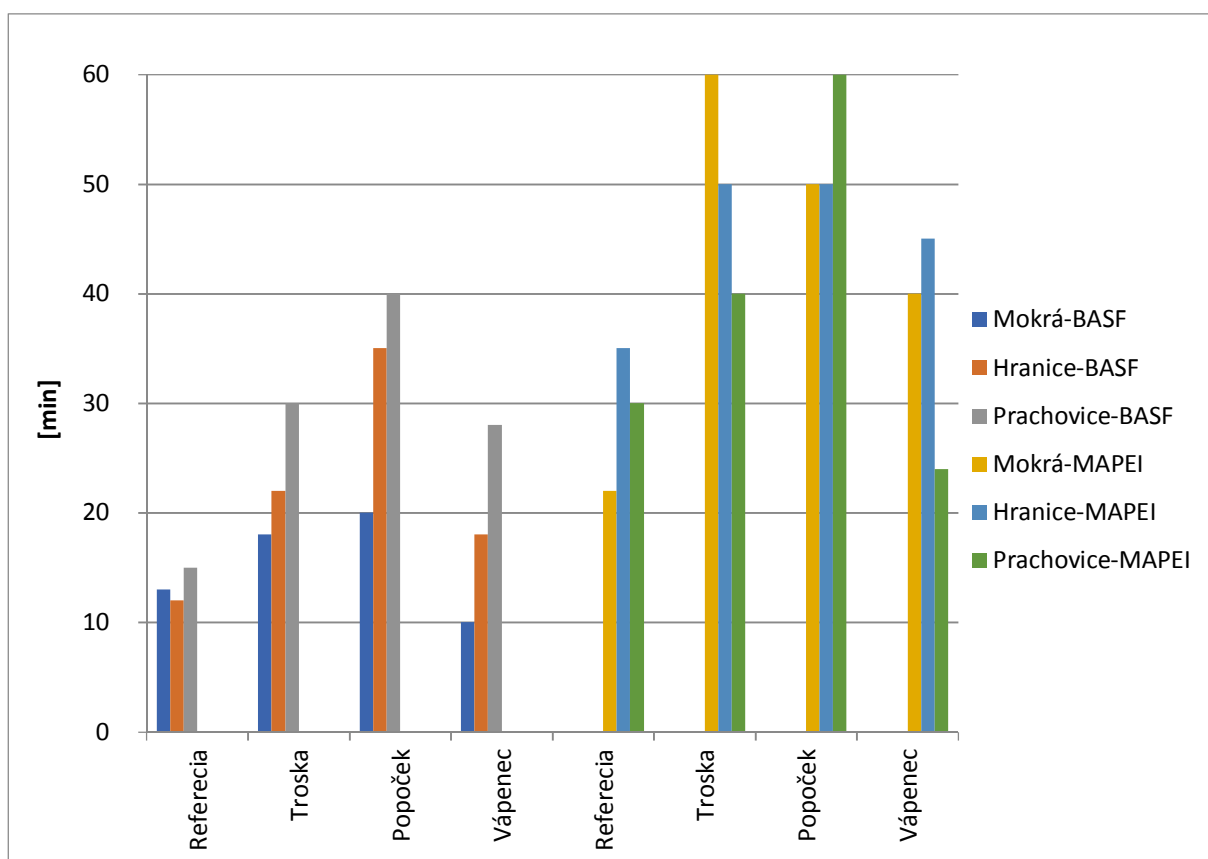
  

[min]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popolček		15% Mikro. vápenec	
MAPEI	začítok	koniec	začítok	koniec	začítok	koniec	začítok	koniec
Mokrú	6	22	10	>50	7	50	5	40
Hranice	5	35	7	50	6	50	5	45
Prachovice	5	30	7	40	8	>50	4	24

Graf č.3 Doby začiatku tuhnutia v závislosti na použitej kombinácii zložiek



Graf č. 4 Doby koncov tuhnutia v závislosti na použitej kombinácii zložiek



#### 4.4.2 PEVNOSTI V ŤAHU ZA OHYBU

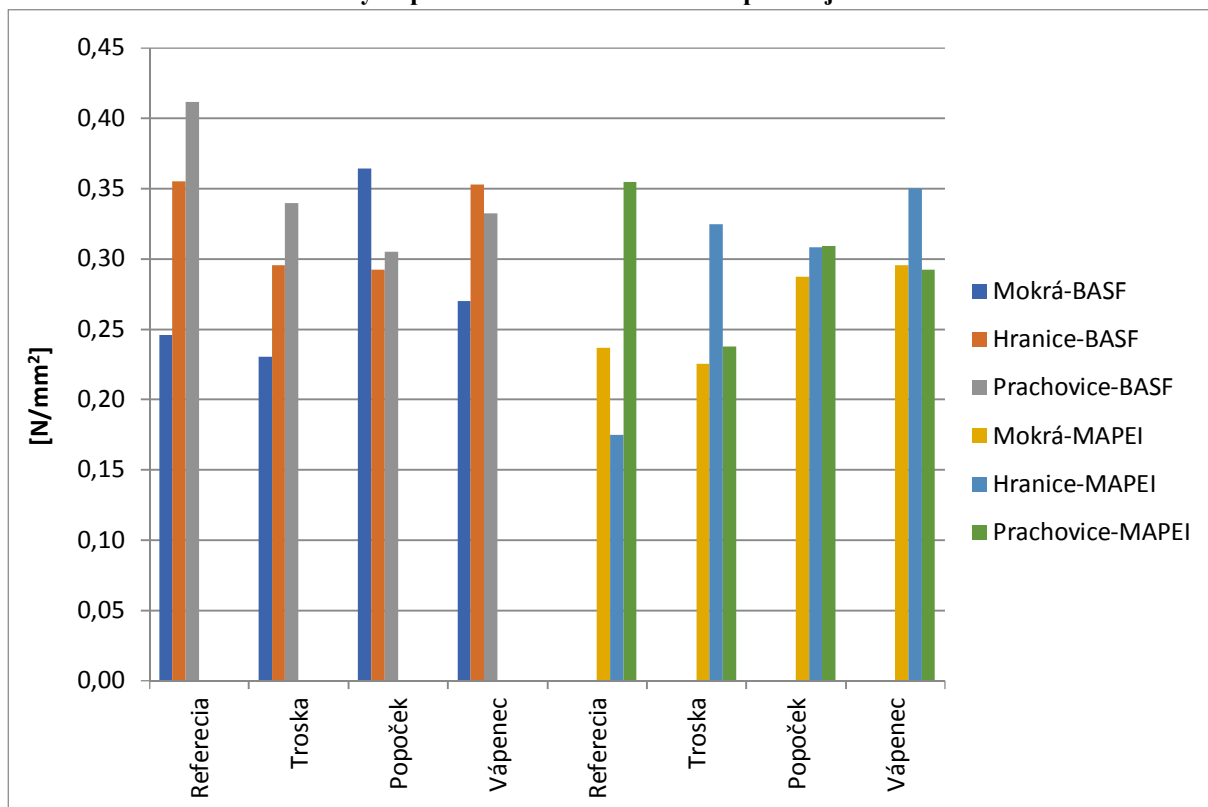
Tabuľka č. 10 Súhrn stanovených pevností v ťahu za ohybu

[N/mm <sup>2</sup> ]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popoček		15% Mikro. vápenec	
BASF	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h
Mokrý	0,25	3,0	0,23	1,6	0,36	1,6	0,27	2,3
Hranice	0,36	3,2	0,30	1,7	0,29	1,7	0,35	2,3
Prachovice	0,41	3,7	0,34	2,9	0,30	3,2	0,33	3,1

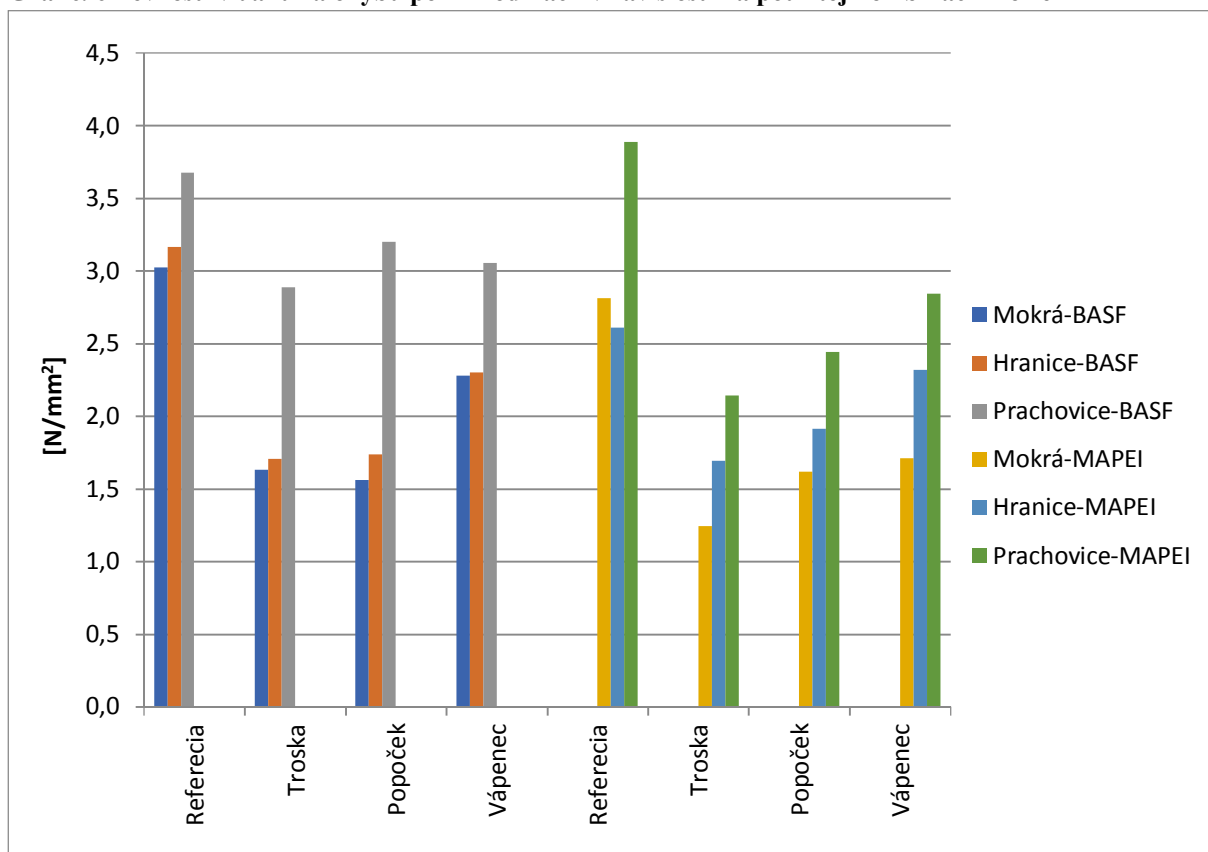
  

[N/mm <sup>2</sup> ]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popoček		15% Mikro. vápenec	
MAPEI	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h
Mokrý	0,24	2,8	0,23	1,2	0,29	1,6	0,30	1,7
Hranice	0,17	2,6	0,32	1,7	0,31	1,9	0,35	2,3
Prachovice	0,35	3,9	0,24	2,1	0,31	2,4	0,29	2,8

Graf č. 5 Pevnosti v ťahu za ohybu po 6 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek



Graf č. 6 Pevnosti v ťahu za ohybu po 24 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek





#### 4.4.3 PEVNOSTI V TLAKU

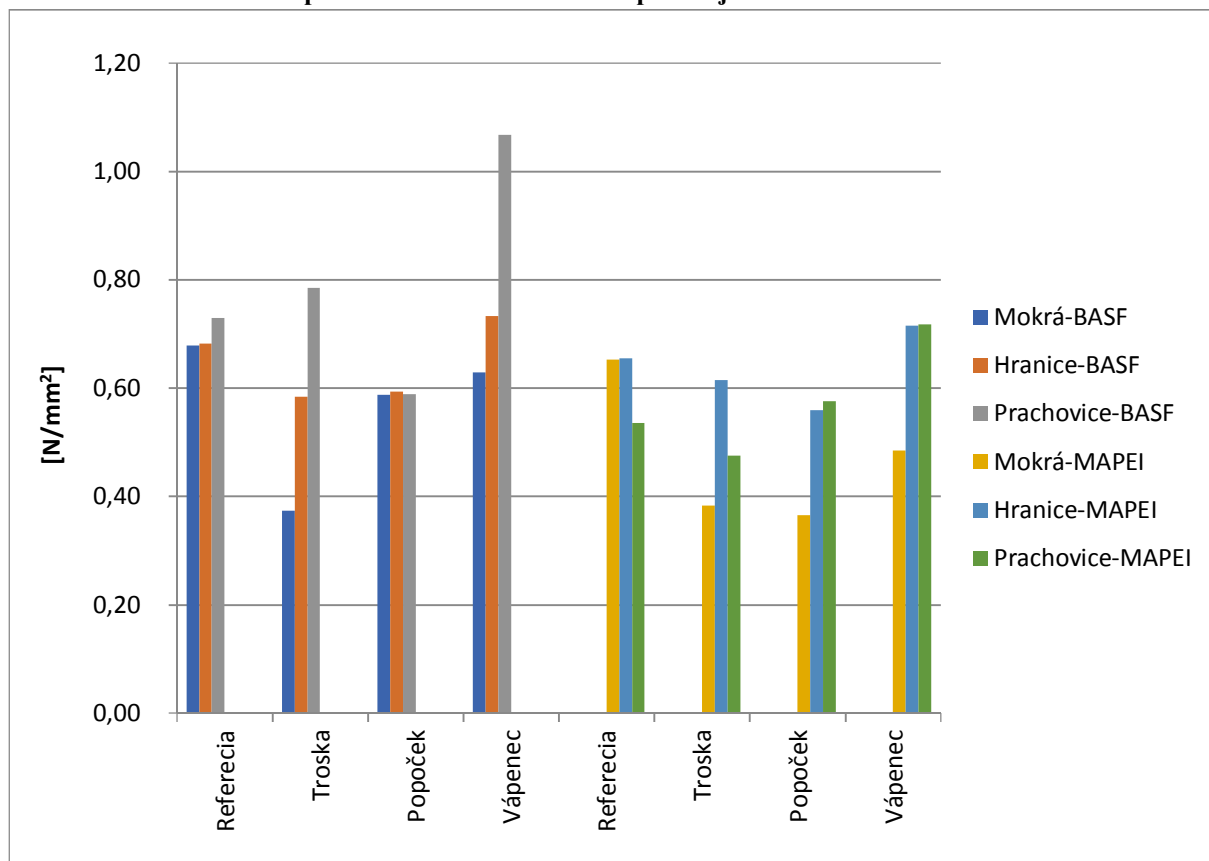
Tabuľka č. 11 Súhrn stanovených pevností v ťahu za ohybu

[N/mm <sup>2</sup> ]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popolček		15% Mikro. vápenec	
BASF	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h
Mokrú	0,68	9,6	0,37	5,5	0,59	5,1	0,63	8,1
Hranice	0,68	10,3	0,58	6,3	0,59	6,6	0,73	7,9
Prachovice	0,73	12,8	0,78	8,5	0,59	10,3	1,07	12,1

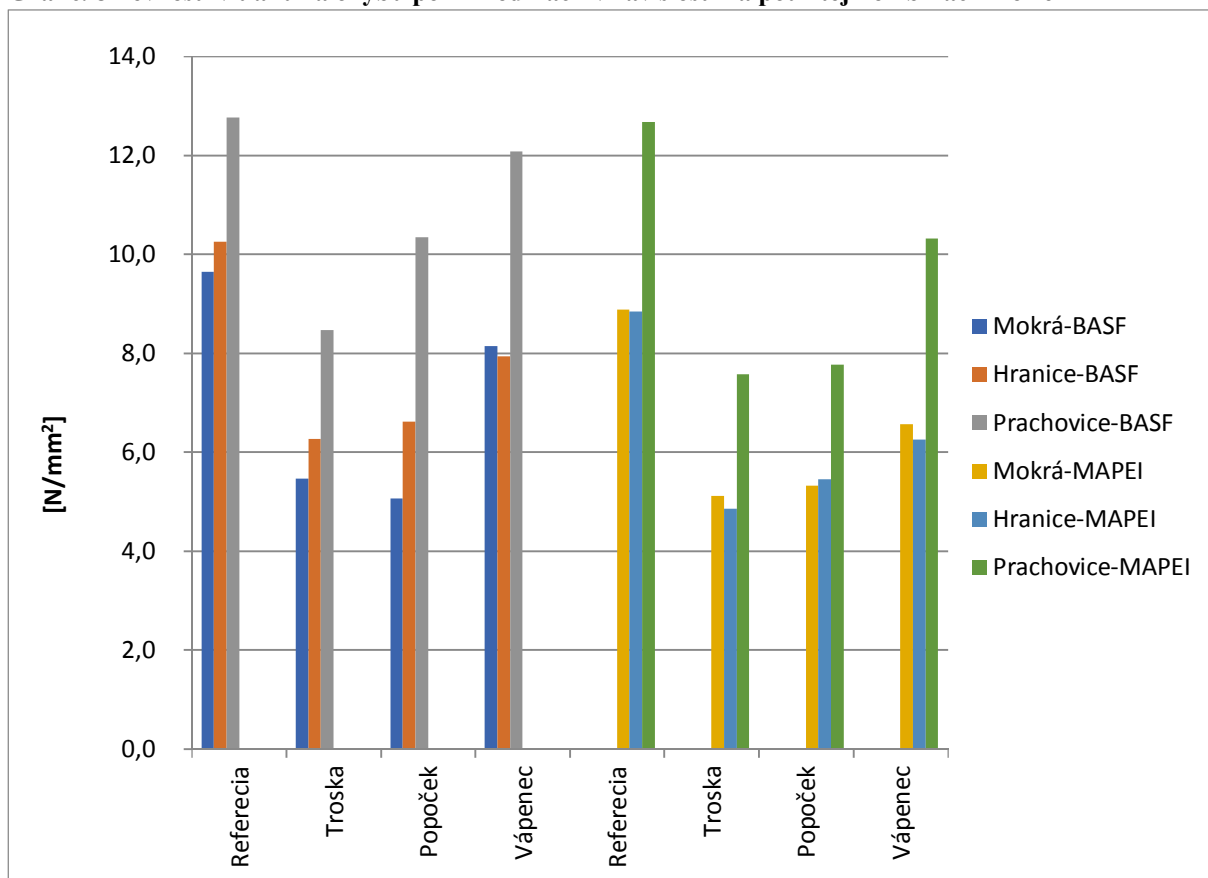
  

[N/mm <sup>2</sup> ]	Referenčná zmes		25 % Troska		25 % Popolček		15% Mikro. vápenec	
MAPEI	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h
Mokrú	0,65	8,9	0,38	5,1	0,36	5,3	0,48	6,6
Hranice	0,66	8,8	0,61	4,9	0,56	5,4	0,71	6,3
Prachovice	0,54	12,7	0,48	7,6	0,58	7,8	0,72	10,3

Graf č. 7 Pevnosti v tlaku po 6 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek



**Graf č. 8 Pevnosti v tlaku za ohybu po 24 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek**



## 4.5 DISKUSIA K VÝSLEDKOM EXPERIMENTOV

V tejto kapitole sú zhrnuté a vyhodnotené výsledky vykonaných experimentov. Na receptúrach s rôznymi kombináciami vstupných surovín, ktoré boli detailne popísané vyššie, bola stanovovaná doba tuhnutia a tvrdnutia pomocou Vicatovho prístroja. Taktiež bola vyhodnocovaná pevnosť v ťahu za ohybu a pevnosť v tlaku (po 6 a 24 hodinách od zamiešania skúšobnej zmesi) na predpísaných vzorkách. Metodika týchto skúšok je bližšie popísaná v kapitole 4.1.2.

Porovnania výsledkov preukázali zjavný vplyv použitých materiálov. Použité boli urýchľovacie prísady od rôznych výrobcov. Podľa výsledkov prísada od výrobcu MAPEI mala vo všeobecnosti slabší účinok na skrátenie doby tuhnutia. V niektorých prípadoch bola doba tuhnutia oproti druhej porovnáwanej urýchľovacej prísade až viac ako dvojnásobne dlhšia. Doby tuhnutia s urýchľovacou prísadou od výrobcu BASF sa pohybovali na veľmi vyrovnanej úrovni od troch do štyroch minút. Pri použití urýchľovača od výrobcu MAPEI boli doby tuhnutia väčšieho rozptylu. Pohybovali sa v rozmedzí od štyroch až po desať minút.

Z týchto hodnôt je však pozorovateľný vplyv použitej prímеси. Vplyv prímеси na dobu tuhnutia je možné vidieť u oboch použitých urýchľovacích prísad. V prípade použitia urýchľovača od firmy BASF je tento účinok možné zreteľne pozorovať len pri použití cementu Hranice. Na zmesiach s urýchľovačom MAPEI je vplyv prísady zreteľnejší. Použitie prímеси ovplyvnilo dobu začiatku tuhnutia očakávaným spôsobom, teda ich predĺžením. Výnimkou je použitie mikromletého vápenca s urýchľovačom MAPEI, kde sa prejavuje miernym skrátením doby tuhnutia oproti referenčnej zmesi. To je pravdepodobne spôsobené tým, že drobné zrná vápenca sa v zmesi správajú ako nukleačné jadrá pre hydratačné splodiny cementových minerálov. Ich tvorba je preto jednoduchšia a rýchlejšia. Pri porovnávaní doby tuhnutia pri použití rôznych cementov je sledovanie tohto parametra zvolenou metódou zaťažené veľkou chybou a z výsledkov nie je možné jednoznačne určiť vplyv daného cementu.

Ďalej bol sledovaný vplyv kombinácií použitých materiálov na dobu konca tuhnutia, teda začiatku tvrdnutia. Stanovením doby konca tuhnutia sa rovnakým spôsobom prejavil účinok urýchľovacej prísady MAPEI, kedy takmer vo všetkých prípadoch pozorujeme dlhšiu dobu tuhnutia na jednotlivých zmesiach. Jedinou výnimkou je kombinácia s cementom Prachovice. V tomto prípade sa doba konca tuhnutia skrátila oproti zmesi s použitím urýchľovača BASF, ale aj oproti referenčnej zmesi bez použitia prímеси. Slabší účinok urýchľovacej prísady MAPEI sa prejavil pri použití trosky a popolčeka do takej miery, že z časových dôvodov nebola doba konca tuhnutia stanovená. Nastala teda až po uplynutí 50 minút od pridania urýchľovacej prísady. Pri zmesiach s urýchľovacou prísadou BASF je dobre viditeľný vplyv cementu, kedy vo všetkých prípadoch cement Prachovice dosahoval najdlhších dôb počiatku tvrdnutia. V prípade použitia urýchľovača MAPEI vplyv rôznych cementov nie je dostatočne zreteľný, keďže hodnoty počiatku dôb tvrdnutia vykazujú veľké výkyvy. Napriek tomu je možné vidieť určitý vplyv použitých prímеси. Vyhodnotenie konca doby tuhnutia vzoriek s oboma urýchľovacími prísadami potvrdzuje predpokladané správanie sa prímеси.

Vyhodnotením výsledkov skúšok pevnosti vzoriek (v ťahu za ohybu a v tlaku – po 6 a 24 hodinách od zamiešania) bol zistený zaujímavý jav, že skúška v ťahu za ohybu po 6 hodinách sa ukázala ako nepreukazná pre vyhodnocovanie kompatibility jednotlivých zložiek zmesí, nakoľko vykazuje veľký rozptyl výsledných hodnôt bez možnosti spoľahlivého vysledovania vzájomných závislostí. Je možné, že pri dôslednejšom vykonávaní laboratórnej skúšky a pri zväčšení štatistického súboru sa dostatočne prejaví preukazné závislosti aj v tomto prípade.

Vyhodnotením pevnosti v ťahu za ohybu po 24 hodinách je v našom prípade už pomerne dobre pozorovateľný vplyv prímiesí aj cementov. Avšak v tomto prípade sa vplyv urýchľovacej prísady neprejavil tak výrazne, ako pri sledovaní dôb tuhnutia a tvrdnutia. Podľa skúšky pevnosti v ťahu za ohybu sa ako najrýchlejšie reagujúci javí cement Prachovice vo všetkých kombináciách zložiek zmesi, taktiež dosahuje najvyššie pevnosti. Naopak – cement Mokrá vykazuje najmenší nárast pevností. Pevnosť zmesi s cementom Hranice sa v prípade urýchľovacej prísady BASF veľmi približuje pevnostiam cementu Mokrá, ale v prípade urýchľovača MAPEI je pevnosť v ťahu za ohybu výrazne odlišnejšia (vyššia). Podľa týchto pevností je evidentný efekt prímiesí. V tomto prípade troska a popolček výrazne znižujú výslednú zistenú pevnosť. Pozoruhodným javom je, cement Prachovice s urýchľovačom BASF je evidentne menej náchylný na negatívny vplyv u všetkých prímiesí.

V našom prípade stanovenie pevnosti v tlaku po 6 hodinách tiež nepotvrdzuje dostatočne preukazne vplyvy jednotlivých zložiek zmesi. Hodnoty mierne naznačujú vplyv prímiesí, ale vzhľadom na malý štatistický súbor sa v našom prípade môže jednať o náhodný jav. Avšak po 24 hodinách je tento vplyv už jednoznačný. Výsledky skúšky pevnosti v tlaku ukazujú podobné efekty ako výsledky skúšky pevnosti v ťahu za ohybu. Cement Prachovice vykazuje výrazne vyššie pevnosti ako ostatné dva skúšané cementy vo všetkých kombináciách.

## 5 ZÁVER

Vzhľadom na skutočnosť, že v súčasnej dobe prebieha rozsiahla výstavba rozvíjajúcej sa dopravnej infraštruktúry s využitím podzemných tunelových stavieb, objem aplikácie striekaných betónov v praxi neustále rastie. Taktiež vznikajú ekonomické tlaky investorov na znižovanie cien striekaných betónov. Používané technológie umožňujú aplikáciu inovovaných receptúr s využitím rôznych prísad a prímiesí do betónu, ktoré môžu znížiť cenu a súčasne aj zvýšiť kvalitu striekaných betónov.

Táto bakalárska práca zhrňa poznatky o striekanom betóne s využitím prímiesí a moderných nealkalických urýchľovacích prísad. V práci sa popisujú vlastnosti a požiadavky na striekaný betón, technológie striekaného betónu, používanie aktívnych prímiesí a urýchľovacích prísad.

V praktickej časti sa overuje možnosť použitia aktívnych prísad s nealkalicou urýchľovacou prísadou, na základe reaktivity s cementovým tmelom. Vykonalo sa overenie a porovnanie dvoch nealkalických urýchľovacích prísad na báze síranu hlinitého od výrobcov BASF a MAPEI. Ako aktívne prísady boli použité: vysokopecná troska, vysokoteplotný popolček a mikromletý vápenec. Testovaný bol tiež vplyv cementov CEM I 42,5 R od rôznych výrobcov: Mokrý, Hranice a Prachovice. Vplyv týchto zložiek a ich vzájomná kompatibilita bola overovaná na základe nasledovných laboratórnych skúšok: stanovenie doby tuhnutia a tvrdnutia (pomocou Vicatovho prístroja), stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu a v tlaku po 6 a 24 hodinách.

Vyhodnotením výsledkov laboratórnych experimentov sa ukázalo, že čiastočná náhrada cementu aktívnymi prísadami má vždy negatívny dopad na všetky testované vlastnosti. Výnimkou je mikromletý vápenec, ktorý nespôsobil až tak výrazný pokles sledovaných vlastností. V určitých (ojedinelých) prípadoch mal dokonca pozitívny účinok, aj keď sa nejedná o úplne aktívnu prísadu. Tento efekt je pravdepodobne spôsobuje mikroskopická štruktúra jeho zŕn, ktoré v zmesi pôsobia ako nukleačné jadrá pre rast kryštálov ettringitu a ďalších spločín hydratačného procesu cementu. Hydratačný proces je preto potom rýchlejší, avšak na druhej strane obsah mikromletého vápenca zvyšuje riziko vzniku thaumasitu, ktorý okrem iného rozkladá C-S-H gél, čo následne spôsobuje deštrukciu betónu. Taktiež sa ukázalo, že použitie rovnakého typu (triedy a značky) cementu, ale od iného výrobcu, môže mať značne pozitívny vplyv na sledované parametre striekaného betónu. Merateľný vplyv na výsledky testov skúmaných vlastností má aj použitie urýchľovacej prísady na rovnakej chemickej báze, avšak od iného výrobcu.

Napriek možnosti použitej testovacej metódy stanoviť reaktivitu cementového tmelu s urýchľovacou prísadou, mnohí autori ju považujú za nepreukaznú, a v niektorých prípadoch dokonca až za zavádzajúcu. Počas vykonávania laboratórnych testov tejto bakalárskej práce sa ukázalo, že jej použitie vyžaduje veľkú skúsenosť a zručnosť a napriek tomu nesimuluje reálny proces výroby striekaného betónu.

Pre pokračovanie výskumu využívania prísad v striekanom betóne je nutné použitie sofistikovanejších skúšobných metód a väčších štatistických súborov vzoriek. Aj keď výsledky experimentov neukázali používanie prísad v pozitívnom svetle, ich efektívne použitie v striekanom betóne určite nie je vylúčené.

## 6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Ing. Matouš Hilar, Msc., Ph.D., CEng., MICE. Stříkaný beton v podzemním stavitelství, svazek 3, vydání 1. Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. ISBN 978-80-254-1262-6
- [2] Zásady pro používání stříkaného betonu., zpracovala pracovní skupina Českého tunelářského komitétu pro stříkaný beton., Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2003
- [3] SPRAYED CONCRETE ASSOCIATION. Introduction to sprayed concrete [online]. 1999 ISBN 1 87098008 5.  
Dostupné z: [http://www.sca.org.uk/pdf\\_word/Intro\\_to\\_Sprayed\\_Concrete.pdf](http://www.sca.org.uk/pdf_word/Intro_to_Sprayed_Concrete.pdf)
- [4] FILAMOS, s.r.o. Technologie stříkání betonů [online]. © 2017 [cit. 2017-05-18].  
Dostupné z: <http://www.filamos.cz/portal/#technologie-strikani-betonu>
- [5] Stříkané betony [online]. Copyright © Beton Server 2006 [cit. 2013-03-28].  
Dostupné z: <http://www.betonserver.cz/franken-maxit-strikane-betony>
- [6] MELBEY, Tom. Stříkaný beton.: MBT International Underground Construction Group 2001. 127s
- [7] ČSN EN 14487-1. Stříkaný beton : Část 1: Definice, specifikace a shoda. [s.l.] : [s.n.], srpen 2006. 33 s
- [8] PYTLÍK, P. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 390 p. Učebnice sv. 1. ISBN 80-214-1647-5
- [9] Rudolf Hela,. Technologie betonu,. Modul M01, BJ 04 Technologie betonu I., Brno 2005.
- [10] PRUDÊNCIO Jr., L. R. Accelerating admixtures for shotcrete. Cement and Concrete Composites. 1998, vol. 20, no. 2-3, p. 213-219.
- [11] PAGLIA, C.; WOMBACHER F.; BÖHNI H. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems. 2001. 6s
- [12] Austrian Concrete Society, Guideline on Shotcrete. Vienna, 1990, 35 pp.

- [13] LOTHENBACH, B.; RENTSCH, D.; WIELAND, E. Hydration of a silica fume blended low-alkali shotcrete cement. 2013. 14s
- [14] COLLEPARDI, Mario. MODERNÍ BETON : THE NEW CONCRETE. 1. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [15] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti
- [16] ČSN EN 196-3+A1. Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti
- [17] ČSN EN 206. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [18] ČSN EN 197-1 ed. 2. Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [19] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [20] ČSN EN 12390-8. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [s.l.] : [s.n.], říjen 2009.
- [21] STN EN ISO 8402: 1996: Manažerstvo kvality. Slovník.
- [22] Adolf Bajza, Ildikó Rouseková,. Technológia Betónu., Bratislava 2006., ISBN 80-8076-032-2
- [23] Tomáš Melichar, David Procházka., studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC., věda a výzkum časopis Beton., vydání 6/2011., s. 66-67
- [24] N. Benscheid, W. vom Berg, H. J. Feuerborn, D. Heinz, I. Hohberg, A. Hugot, D. Lutze, M. Mengede, R. Pierkes, E Schneider, U. Wiens., Příručka Popílek v betonu, Základy výroby a použití., 2. přepracované vydání., Dortmund a Aachen 2008., ISBN 978-3-7640-0502-3
- [25] Dominik Gazdič, Marcela Fridrichová, Jan Novák, VUT FAST Brno., Využití vysokopecní strusky a přírodního anhydritu k přípravě struskosíranového pojiva

- [26] Romer, M.; Holzer, L.; Pfiffner, M. Swiss tunnel structures: concrete damage by formation of thaumasite
- [27] Carrasco M.F., Strength optimization of tailor – made cement with limestone filler and blast furnace slag., cement and concrete research., 2005., s. 1324-1331
- [28] Han, J.; Wang, K.; Wang, Y.; Shi, J. Study of aluminum sulfate and anhydrite on cement hydration process. 2014. 11s
- [29] ZÁMEČNÍK, M., Použití směsných cementů do stříkaných betonů už i v ČR, 9. Konference technologie betonu 2010 [online]. 2010 [cit. 2017-20-05]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4003364-Pouziti-smesnych-cementu-do-strikanych-betonu-uz-i-v-cr.html>

## 7 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

- Obr. 1 Skúšobný blok striekaného betónu tunela Višňové
- Obr. 2 Betonáž nosných stien podzemných garáž nástrekom mokrou cestou, Dallas, Texas
- Obr. 3 Schéma technológie nástreku suchou cestou
- Obr. 4 Schéma technológie nástreku mokrou cestou s hutným prúdom
- Obr. 5 Schéma technológie nástreku mokrou cestou s riedkym prevzdušneným prúdom
- Obr. 6 Použitá normová miešačka
- Obr. 7 Vicatov prístroj a prstenec
- Obr. 8 Skúšobný hydraulický lis použitý pre stanovenie pevnosti
- Obr. 9 Použité oceľové trojformy s čerstvými skúšobnými telesami o rozmeroch 40x40x160 mm
- Obr. 10 Normový nástavec na stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu pre 3-bodový ohyb so vzdialenosťou podpier 100 mm
- Obr. 11 Normový nástavec na stanovenie pevnosti v tlaku s tlačnou plochou 1600 mm<sup>2</sup>

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV

- Graf č. 1: Hraničné krivky pre jednotlivé obory nábehov pevností
- Graf č. 2: Odporúčané pásmo krivky zrnitosti kameniva pre striekaný betón
- Graf č. 3: Doby začiatku tuhnutia v závislosti na použitej kombinácii zložiek
- Graf č. 4: Doby koncov tuhnutia v závislosti na použitej kombinácii zložiek
- Graf č. 5: Pevnosti v ťahu za ohybu po 6 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek



Graf č. 6: Pevnosti v ťahu za ohybu po 24 hod. v závislosti na použitej kombinácii zložiek

Graf č. 7: Pevnosti v tlaku po 6 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek

Graf č. 8: Pevnosti v tlaku po 24 hodinách v závislosti na použitej kombinácii zložiek

## **9 ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK**

Tabuľka č. 1: Predpísané minimálne pevnosti v tlaku mladého striekaného betónu pre  
pevnostné triedy v  $\text{N/mm}^2$

Tabuľka č. 2: Triedy pevnosti striekaného betónu

Tabuľka č. 3: Medze zrnitosti kameniva odporúčané pre striekaný betón

Tabuľka č. 4: Obvyklé zastúpenie jednotlivých chemických zložiek vo vysokopecnej troske

Tabuľka č. 5: Porovnanie základných vlastností alkalických a nealkalických urýchľovačov

Tabuľka č. 6: Prehľad použitých materiálov

Tabuľka č. 7: Hmotnostné navážky zložiek pre použité receptúry

Tabuľka č. 8: Prehľad všetkých testovaných kombinácií cementov, prímiesí a urýchľovacích  
prísad

Tabuľka č. 9 Súhrn stanovených dôb začiatku a konca tuhnutia v minútach

Tabuľka č. 10 Súhrn stanovených pevností v ťahu za ohybu

Tabuľka č. 11 Súhrn stanovených pevností v ťahu za ohybu